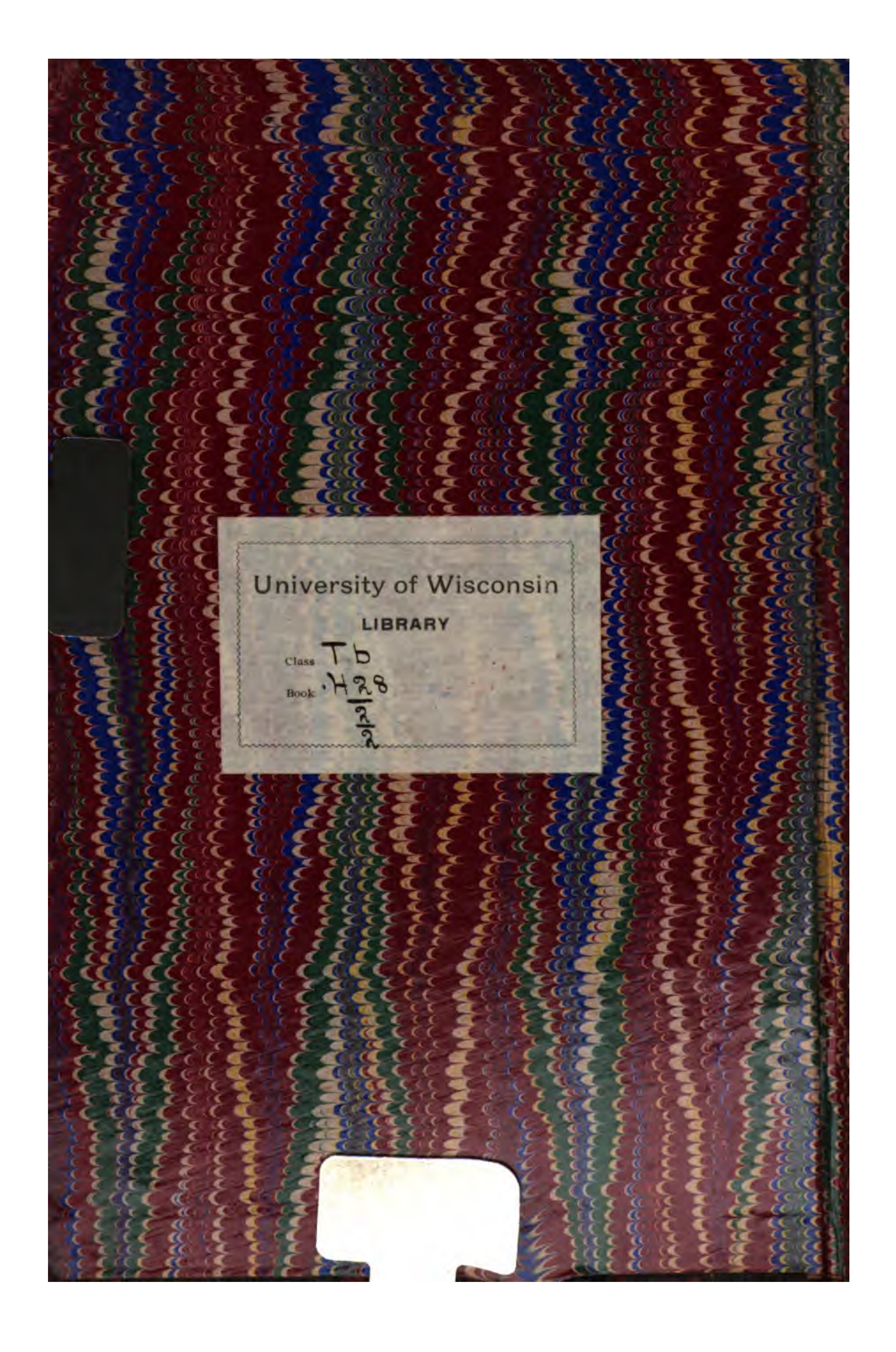



University of Wisconsin
LIBRARY
Class TD
Book .H28



COURS

DE

MACHINES

24412 — PARIS. IMPRIMERIE LAHURE
9, rue de Fleurus, 9

COURS

DE

MACHINES

PAR

M. HATON DE LA GOUPILLIÈRE

Membre de l'Institut
Inspecteur général des Mines
Directeur de l'École nationale supérieure des Mines
Membre de la Commission centrale des Machines à vapeur
et du Comité de l'Exploitation technique des chemins de fer

TOME SECOND

—

SECOND FASCICULE

Chaudières à vapeur

PARIS

V^VE CH. DUNOD, ÉDITEUR

LIBRAIRE DES CORPS DES PONTS ET CHAUSSÉES ET DES MINES

49, QUAI DES AUGUSTINS, 49

—

1892

CINQUIÈME PARTIE

CHAUDIÈRES A VAPEUR

CHAPITRE LIII

COMBUSTION

§ 1

SURFACE DE CHAUFFE

932 — *Influence de la température.* — La conception fondamentale de la thermodynamique nous présente, dans toute machine à feu, un corps destiné à servir de véhicule à la chaleur pour mettre en rapport une *source chaude* et une *source froide*. Il transporte à celle-ci le calorique qu'il emprunte à la première, à l'exception de la portion qui a été changée en travaux de toutes natures.

En ce qui concerne en particulier la machine à vapeur, le moteur proprement dit, dont l'étude a fait l'objet de la quatrième partie de ce Cours, constitue le laboratoire dans lequel s'accomplit cette transformation. Il nous reste maintenant à joindre à sa description celle des deux sources en question. Ce sera l'objet de cette cinquième partie.

Nous envisagerons en premier lieu la source chaude, appelée habi-

34

tuellement *chaudière à vapeur* ou *générateur de vapeur* (1). Il est naturel en effet de commencer par elle, car la source froide, ou condenseur, ne se rencontre pas dans toutes les machines, dont

(1) Denfer. *Traité pratique des chaudières à vapeur*, gr. in-4°. — Delvordre. *Traité pratique sur les chaudières à vapeur*, in-8°. — Laurent et Dunkel. *Album des constructeurs de chaudières à vapeur*, 1875, in-8°. — Poillon. *Cours théorique et pratique de chaudières et de machines à vapeur*. — Delevacque. *Études sur les chaudières à vapeur*, gr. in-8°. — G. Richard. *Les chaudières de locomotives*, gr. in-4°. — Bour. *Notes sur l'installation des chaudières à vapeur*, 1881. — Delaunay. *Études sur les générateurs à vapeur à haute pression*, 1878, in-8°. — Keller, Ludwig et Walther-Meunier. *Chaudières et moteurs à vapeur*, gr. in-8°. — Havrez. *Chaudières à vapeur à vaporisation décroissante en progression géométrique*, in-8°. — Havrez. Chaudières à vapeur accolées. *Revue universelle des mines et de la métallurgie*, 1874, t. I, p. 235. — Massart. Études sur les nouveaux générateurs pour machines fixes. *Ibidem*, 2e série, t. XVII, p. 315, 537 ; XVIII, 30. — Benoit (*Cours de chaudières à vapeur à l'usage des chauffeurs*, in-16. — Traité de chaudières à vapeur à l'usage des propriétaires d'appareils à vapeur, in-12). — Desnos et Baretta. *Les nouvelles chaudières à vapeur*, 1881, in-4°. — Hervier. *Les appareils à vapeur*, in-12. — Bougarel. Les générateurs à l'Exposition de 1889. *Revue technique de l'Exposition internationale de* 1889, décembre 1889, n° 3 ; mars 1890, n° 9. — Périssé. Les chaudières à vapeur à l'Exposition de 1889. *Mémoires de la Société des Ingénieurs civils*. — Regnard. Les chaudières à vapeur à l'Exposition de 1889. *Ibidem*. — Compère. Les chaudières à vapeur à l'Exposition de 1889. *Ibidem*. — Chabaud. Note sur les générateurs de vapeur à l'Exposition de Vienne. *Bulletin de la Société de l'industrie minérale de Saint-Étienne*, 2e série, t. III, p. 121.

Hirsch et Debize. *Leçons sur les machines à vapeur*, t. I, p. 274. — Callon. *Cours de machines*, t. II, p. 754. — Jacqmin. *Traité de machines à vapeur*, t. I, p. 100. — Ser. *Traité de physique industrielle*, t. II, p. 13. — Couche. *Voie, matériel roulant, exploitation technique des chemins de fer*, t. III, p. 3. — Richard et Baclé. *Manuel du mécanicien conducteur de locomotive*, p. 23. — Bienaymé. *Traité des machines marines*, p. 426. — Ledieu. *Les nouvelles machines marines*, t. III, p. 42. — Delaunay. Comparaison des divers types de chaudières. *Les Mondes*, t. XXXVII, p. 202. — Haton de la Goupillière. *Annales des mines*, 7e série, t. XVI, p. 165. — Sauvage (Revue de l'état actuel de la construction des machines. *Ibidem*, mai-juin et novembre-décembre 1890. — Production de la vapeur. *Congrès international des chemins de fer*, 1892, question X) — Chaudières. *Revue universelle des mines et de la métallurgie*, 1875, t. 1, p. 466 ; II, 1288 ; 1re série, t. XXVIII, 158. — Chaudières. *Les Mondes*, t. XXXIII, p. 48.

Wilson. *A Treatise on steam boilers*. — Knight. *Practical boiler-maker*, in-8°. — Smart. The modern practice in the construction of steam boiler. *Proceedings of the Institution of civils Engineers*, 1884-84. — Hutton. *Steam boiler construction*, in-8°. — W. Rankine. *Manuel de la machine à vapeur*. Traduction par G. Richard, p. 474, 684.

Fallenstein. *Dampfkessel, deren rationelle Construction, Anlage und Betrieb*. — Von Gutbier. *Hilfsbuch für den Dampfkesselbetrieb, die Gewichts und Druckvergleichungen*, 1874, Leipzig. — Diesz. *Taschenbuch über Dampfkesselanlagen*. — Thielmann. *Lehr und Handbuch der Dampfkessel*, Leipzig, 1879. — Bede. De l'économie de combustible, avec considérations sur l'installation des chaudières à vapeur. *Glaser's Annalen für Gewerbe und Bauwesen*, 1879. — Hildebrandt. *Sur les dispositions mécaniques pour le chauffage des machines à vapeur*, Berlin 1880. — Reiche (*Der Dampfmaschinen-construction*. Aachen, 1880. — *Recherches sur les chaudières à l'Exposition de Dusseldorf en* 1880, Aachen). — Simerka. *Dampfkessel*, in-8°, Pilsen, 1884.

beaucoup sont à échappement libre. Le générateur, au contraire, existe de toute nécessité. En outre, on voit souvent des chaudières sans machines, destinées à fournir la vapeur nécessaire à certaines industries calorifiques ou chimiques.

933 — Il s'est introduit un usage regrettable, qui tend d'ailleurs à disparaître. Il consiste à caractériser l'importance d'une chaudière par le nombre de chevaux auquel elle est censée correspondre. Une telle expression manque essentiellement de précision ou, pour mieux dire, elle constitue un véritable non-sens.

D'une part, en effet, elle ne saurait servir pour des générateurs qui ne sont pas associés à un moteur. Mais, dans ce cas même, la puissance dynamique qu'on pourra tirer de telle ou telle chaudière dépendra essentiellement de la manière dont le moteur utilisera le fluide produit par elle.

On peut ajouter à cet égard que, dans l'association d'un générateur et d'un récepteur, c'est bien plus la chaudière que la machine qui détermine la puissance de l'ensemble. En adaptant à un petit cylindre un générateur important, il suffira de mener vite le piston pour développer un grand nombre de chevaux. Avec une faible chaudière, au contraire, le plus grand cylindre ne pourrait que fonctionner lentement et fournir par unité de temps une quantité d'énergie très limitée; car elle reste forcément proportionnelle au poids de vapeur engendré et dépensé pendant cet intervalle.

C'est donc dans le générateur lui-même qu'il convient de chercher la véritable caractéristique de sa puissance. Cette caractéristique est *la quantité d'eau qu'il peut vaporiser en une heure dans des conditions bien définies*.

934 — Ces conditions dépendent naturellement de la température, et par suite de la pression [1]. Mais il est facile de reconnaître tout d'abord que cette influence aura très peu d'effet.

Rappelons à cet égard l'équation :

$$\lambda = 606,5 + 0,305\,\theta,$$

[1] Voy. t. I, p. 771.

qui définit la quantité de chaleur nécessaire pour porter 1 kilogramme d'eau du point de fusion de la glace à la température θ du thermomètre usuel, et l'y volatiliser sous la pression correspondante. On voit que le premier de ses deux coefficients est à peu près 2000 fois plus grand que l'autre. Chaque degré de température fera donc varier le résultat de 1/2 millième de sa valeur. Comme d'ailleurs le thermomètre s'élève peu lorsque la pression vient à s'accroître, même d'une manière notable, il s'ensuit que la variation proportionnelle de la fonction λ sera toujours très limitée.

Par exemple, pour passer de 5 à 10 atmosphères, on ne parcourt qu'une amplitude de 30 degrés environ, ce qui donnera pour λ un accroissement de 1, 5 %; résultat bien peu important, qui disparaîtra sous diverses influences accessoires.

935 — *Surface de chauffe*. -- L'élément qui sert à différencier réellement les chaudières les unes des autres au point de vue de leur puissance de vaporisation est la ***surface de chauffe***, c'est-à-dire l'étendue de la tôle qui, baignée par l'eau sur l'une de ses surfaces, se trouve pour l'autre au contact des gaz chauds du foyer ([1]).

Il est inutile d'ajouter que l'effet produit par une même superficie dépendra très directement de la manière plus ou moins efficace dont elle sera mise en œuvre pour utiliser la chaleur développée par la combustion. A cet égard, on rencontre la plus grande variété. Tandis que, dans certains cas, le mètre carré de surface de chauffe ne vaporisera par heure que 10 à 15 kilogrammes d'eau, l'on arrive souvent au chiffre de 20, 30 et 40 kilogrammes ([2]).

Il faut d'ailleurs se garder d'en déduire hâtivement que ces divers nombres devront, dans chaque cas, servir de mesure au degré d'estime dans lequel il y aura lieu de tenir tel ou tel générateur. Cette question présente bien des faces distinctes.

La plus essentielle est évidemment l'économie de combustible.

([1]) Manière d'évaluer la surface de chauffe des générateurs. *Quatrième Congrès des Ingénieurs en chef des Associations de Propriétaires d'appareils à vapeur*. Rouen, 1881, p. 37.

([2]) On obtient des chiffres incomparablement plus élevés dans des circonstances exceptionnelles, qui ne pourraient servir de type pour une marche normale (voy. n° 958, note 1, et n° 1186.

Mais cette considération même ne saurait suffire à elle seule, et bien des points de vue divers viendront s'y adjoindre au fur et à mesure que nous avancerons dans cette étude.

Sous ce point de vue du moins, nous pouvons ajouter dès à présent que, pour réaliser la plus grande *économie de charbon*, il convient d'employer une grande surface, et de réduire le *coefficient d'utilisation* à sa valeur minima : 10 à 12 kilogrammes. Toutefois comme le combustible n'est pas le seul facteur de l'*économie pécuniaire*, qui dépend en même temps de l'importance du personnel, de l'entretien, des frais de premier établissement, etc., on pourra trouver avantageux, si le combustible est à bon marché, d'élever ce chiffre à 15 ou 20 kilogrammes.

936 — Quoi qu'il en soit, c'est ce coefficient qui permettra, dans l'établissement d'un projet, de déterminer les dimensions à donner au générateur dont le type aura été une fois choisi. Il nous met en effet en état d'évaluer la surface de chauffe totale que devra présenter cet appareil, pour correspondre à la puissance dynamique demandée.

Ce calcul est très simple, et je me contenterai de l'expliquer sur un exemple. Nous supposerons à cet effet, d'après les résultats constatés couramment pour les chaudières du type adopté, en les supposant bien établies, que l'on puisse compter sur une vaporisation de 20 kilogrammes d'eau à l'heure. Le résultat varierait naturellement en raison inverse du nombre que l'on viendrait à substituer à celui-ci.

Il est encore nécessaire, pour cette détermination, de posséder le rendement du moteur, dont le type aura été également défini à l'avance. Supposons, à cet égard, que l'appareil soit de nature à consommer n kilogrammes de charbon par cheval-heure [1].

Le pouvoir calorifique de ce combustible devra de même être donné, car c'est un élément essentiellement variable. On l'exprime ordinairement en calories ; mais comme nous connaissons d'autre part le nombre de calories qui est nécessaire pour la production

(1) Voy. t. I, p. 821.

de 1 kilogramme de vapeur à la pression de régime, nous pouvons prendre ici directement sous cette dernière forme le pouvoir en question. En fait, on arrive rarement dans la pratique à vaporiser plus de 7 à 8 kilogrammes d'eau à l'aide de 1 kilogramme de houille. Admettons ici le dernier de ces deux chiffres.

La chaudière devra, d'après cela, vaporiser $8n$ kilogrammes d'eau par cheval-heure; et comme un mètre carré de surface de chauffe est supposé en fournir 20, il faudra $\frac{8n}{20}$ ou $\frac{2n}{5}$ mètres carrés pour la rendre capable d'entretenir pendant une heure la puissance d'un cheval.

937 — Par exemple, pour qu'un mètre carré correspondît précisément à un cheval, il faudrait avoir en particulier :

$$\frac{2n}{5} = 1, \qquad n = \frac{5}{2} = 2^{kg},50;$$

ce qui est un rendement assez fréquent dans la pratique.

Pour réaliser un poncelet de 100 kilogrammètres par seconde, on devra évidemment majorer la surface d'action dans le rapport de 3 à 4. Si donc nous voulons au contraire la faire encore rentrer dans la même étendue d'un mètre carré, il sera nécessaire d'améliorer le rendement dans la même proportion, ou de diminuer n dans le rapport inverse :

$$n = \frac{3}{4} \cdot 2,5 = 1^{kg},88;$$

résultat que la perfection actuelle de la construction permet facilement d'atteindre [1].

938 — Dans tout ce qui précède, la surface de chauffe a été

[1] On n'oubliera pas que ces résultats spéciaux restent essentiellement corrélatifs du choix particulier du coefficient de vaporisation, qui a été fixé à 20 kilogrammes d'eau par mètre carré et par heure.

envisagée en bloc avec son efficacité *moyenne*, rapportée au mètre carré et à l'heure. Mais l'efficacité *réelle* de chaque élément superficiel est très variable, depuis les parties les plus voisines du foyer, qui font beaucoup de besogne([1]), jusqu'aux plus éloignées, sur lesquelles on peut, par la pensée, ajouter ou retrancher sans modifier beaucoup le résultat total. Il faudrait, en effet, théoriquement un développement infini pour parvenir à identifier les températures de la masse gazeuse et de la tôle. Il est facile de s'en rendre compte de la manière suivante.

Soit à cet effet θ_1 cette dernière, θ_0 la température initiale des flammes, et θ la valeur qu'elle conserve à une distance quelconque x du point de départ. Sur un développement dx, il s'opère un abaissement thermométrique $d\theta$ proportionnel au flux de chaleur qui traverse cet élément. Ce dernier est lui-même, pour une surface supposée cylindrique, proportionnel à l'étendue dx et à la différence locale $\theta - \theta_1$ des températures. On peut donc poser, avec une constante A :

$$d\theta = - A(\theta - \theta_1)dx,$$

$$\frac{d(\theta - \theta_1)}{\theta - \theta_1} = - A dx;$$

et en intégrant depuis le point de départ, avec un logarithme népérien :

$$L\left(\frac{\theta - \theta_1}{\theta_0 - \theta_1}\right) = - Ax,$$

$$\theta - \theta_1 = (\theta_0 - \theta_1)e^{-Ax}.$$

On voit par là que l'écart des températures décroît en progression géométrique, quand la distance augmente en progression arithmétique.

([1]) Un essai de Petiet (*Revue industrielle*, 13 décembre 1876) a montré que, pour le dispositif spécial qui se trouvait soumis à l'expérience, une étendue de 100 mètres carrés partagée en cinq zones successives de 20 mètres carrés chacune fournissait pour ces dernières, dans leur ordre d'éloignement, les proportions suivantes en centièmes sur la vaporisation totale :

68,0 ; 15,0 ; 9,0 ; 5,5 ; 2,5.

Pour éviter un trop rapide refroidissement des flammes au contact de la paroi métallique mouillée sur sa face interne, en diminuant la valeur de A, l'on garnit parfois la partie antérieure du générateur d'un revêtement en briques réfractaires.

939 — On appelle, d'après cela, surface de chauffe *directe* celle qui *voit le feu*, actionnée aussi bien par la radiation immédiate du foyer que par la convection, c'est-à-dire le contact des gaz chauds; et surface *indirecte* celle qui ne subit que cette seconde influence, d'une manière décroissante au fur et à mesure qu'elle s'éloigne du théâtre de la combustion. Le développement proportionnel de la première tend à augmenter la puissance, et celui de la seconde l'économie.

Il ne faudrait pourtant pas, dans l'établissement d'un projet, s'exagérer l'importance de cette distinction. La quantité de chaleur qui n'est pas cédée immédiatement au métal restant forcément dans les gaz, les rendra plus actifs pour les régions ultérieures. L'élément décisif à cet égard est la température finale du courant gazeux, qui nous occupera en temps et lieu (n° 953).

En partant de ces vues, on a souvent cherché à ménager le *métal du coup de feu* à l'aide d'écrans ou de revêtements réfractaires, et il n'a pas paru que le rendement final ait eu beaucoup à en souffrir (¹).

940 — Il est important de bien spécifier dans chaque cas si le chiffre que l'on indique pour la surface de chauffe concerne l'étendue de la surface de contact entre les gaz chauds et la tôle, ou bien celle qui sépare cette dernière de l'eau. C'est la première qui forme l'élément le plus intéressant, comme permettant de recueillir la chaleur sans la laisser emporter par le torrent fluide à la cheminée. Une fois entrée dans le métal, elle passera facilement à l'eau, quelle que soit la surface mouillée (²).

(¹) On peut citer notamment sous ce rapport les essais de M. Vanderber sur les locomotives hongroises, et ceux de M. Anderson en Suède (Sauvage. Revue de l'état actue de la construction des machines. *Annales des mines*, novembre-décembre 1890, p. 559. — Pechar. Die Lokomotiv-Fenerbüchse. *Glaser's Annalen*, 1884).

(²) Voy. n° 956.

A la vérité cette distinction sera bien souvent tout à fait insignifiante; mais, avec certains types qui emploient un grand nombre de tubes de faible diamètre et d'une certaine épaisseur, la différence peut aller jusqu'à un dixième.

§ 2

COMBUSTIBLES

941 — *Pouvoir calorifique.* — Un générateur de vapeur, pas plus qu'aucun autre appareil, ne saurait créer par lui-même de l'énergie. Il ne peut qu'en opérer le déplacement. L'énergie calorifique fournie par le jeu de forces naturelles, et dénaturée à des époques diverses par des réactions chimiques endothermiques, s'est emmagasinée dans certains matériaux sous la forme potentielle. Il nous suffit aujourd'hui de la remettre en activité en développant, au moment voulu, des réactions exothermiques appropriées. Il ne reste ensuite qu'à recueillir la chaleur ainsi mise en liberté, et à la transmettre à l'eau, qu'elle convertit en vapeur.

Dans la liste si nombreuse des réactions chimiques qui appartiennent à cette dernière catégorie, la pratique industrielle emploie uniquement (1) l'union de l'oxygène avec le carbone et l'hydrogène; phénomène qui a reçu le nom de *combustion*. Les matériaux qui nous présentent dans la nature ces deux corps simples à l'état convenable, sont appelés *combustibles*.

Il existe des combustibles solides, liquides ou gazeux. On les distingue également en naturels (2) et artificiels, obtenus à l'aide

(1) On peut toutefois citer encore à cet égard l'exemple du développement de chaleur qui accompagne l'hydratation de la soude, et qui fournit le principe du fonctionnement de la chaudière Honigmann (n° 107).

Ajoutons encore que le soufre se rencontre également dans les houilles pyriteuses. Mais sa combustion ne dégage qu'une quantité de chaleur insignifiante. Cette circonstance doit d'ailleurs être considérée comme beaucoup plus nuisible qu'utile, en raison de la corrosion des grilles dont elle transforme le fer en sulfure, et du dégagement d'acide sulfureux qui attaque les tôles en se condensant dans les suies à l'état d'acide sulfurique (n° 1145).

(2) Houille, anthracite, lignite, tourbe, bois, paille, pétrole, gaz naturel, etc.

des premiers par voie d'agglomération [1], de carbonisation [2], de distillation [3], ou autres dénaturations [4].

Bien qu'on ait réussi (chap. LVII) à utiliser, pour le chauffage des chaudières, les combustibles les plus divers, on n'y affecte d'une manière véritablement courante que la houille, c'est-à-dire le résidu métamorphique des végétaux qui se sont développés sous l'influence de l'énergie solaire aux dépens de l'acide carbonique et de la vapeur d'eau que renfermait en abondance l'atmosphère de l'époque houillère. Ce produit constitue d'après cela, depuis ces temps reculés, un véritable magasin d'énergie potentielle, que le mineur va reprendre aujourd'hui dans le sein de la terre, et que le chauffeur remet en activité sur la grille de son foyer.

942 — On distingue, parmi les houilles, diverses catégories d'après la manière dont elles se comportent avec l'air aux températures élevées.

La *houille sèche à longue flamme* est dure, compacte, légère, à cassure unie et conchoïdale. On la voit s'effriter sous l'action de la chaleur. Par la carbonisation, elle laisse un coke peu consistant.

La *houille grasse à longue flamme* présente une cassure un peu lamelleuse. Elle fournit 250 à 300 litres d'un gaz bien éclairant, et procure un coke léger.

La *houille grasse proprement dite* est d'un noir éclatant, de structure feuilletée et de consistance moyenne. Elle se gonfle et s'agglutine sous l'empire de la chaleur. Elle donne un coke compact.

La *houille grasse à courte flamme* est noire et d'un éclat assez vif, plus friable que la précédente, se gonflant moins, mais s'agglutinant encore, pourvu qu'elle ne soit pas détériorée par une longue

(1) Briquettes de houille, charbon de Paris, mottes de tannée.

(2) Coke, charbon de bois, charbon de tourbe.

(3) Gaz de l'éclairage, gaz à l'eau, gaz à l'air, gaz métallurgiques, huiles de gaz, goudrons.

(4) Copeaux, sciure de bois, bagasses de sucrerie, rafles de maïs.

On peut joindre pour mémoire à la liste des sources de chaleur appliquées au chauffage des générateurs, l'irradiation solaire directe (t. I, p. 860).

exposition à l'air. La flamme est courte et peu brillante, mais le rayonnement est énergique. Le coke est dur et compact.

La *houille maigre* donne également une courte flamme. Elle est noire, striée, peu consistante, s'enflammant et s'agglomérant avec difficulté. Elle fournit un coke sans consistance.

L'*anthracite* est du carbone presque pur, contenant très peu de matières volatiles et souvent quelques centièmes seulement de cendres. Ce charbon est noir, parfois un peu grisâtre. Il est dur, assez dense, et d'une cassure conchoïdale. Il laisse un coke pulvérulent.

943 — Indépendamment du carbone et de l'hydrogène, les houilles renferment aussi de l'oxygène et de l'azote, ainsi que diverses substances minérales provenant des circonstances de leur formation sédimentaire. Ces dernières se retrouvent après la combustion sous le nom de *cendres*. Elles ne présentent aucune valeur sous le rapport calorifique, et absorbent même une certaine quantité de chaleur pour leur propre échauffement. De plus, elles donnent naissance, par leur fusion partielle, à des *mâchefers* qui encrassent les grilles et obligent à des nettoyages fort pénibles pour les chauffeurs, et nuisibles à la bonne marche des appareils.

Il convient de mentionner également, comme matière inerte, l'humidité qui imprègne le combustible en proportion variable et parfois importante. Elle exerce sur le *pouvoir calorifique* une influence, non pas même nulle, mais négative, en soustrayant un certain nombre de calories pour fournir à sa propre vaporisation ([1]).

944 — En outre de ces causes de diminution du pouvoir calorifique ([2]) de l'unité de poids, les éléments actifs, carbone et hydro-

([1]) Il convient toutefois d'excepter à cet égard les *foyers fermés* (n° 1063), dont tous les produits gazeux sont envoyés indistinctement au cylindre. Dans ce cas spécial, la quantité de vapeur ainsi formée n'est plus inutile, comme lorsqu'elle se rend à la cheminée sans passer par la machine.

([2]) Il est important que cette expression soit exactement déterminée, et pour cela qu'elle soit rapportée à des repères fixes. On devra donc supposer dans les évaluations le combustible et l'air pris à la température de la glace fondante et à la pression normale de 760 millimètres de mercure. On ramènera de même les produits de l'opération à cette température, en supposant d'ailleurs qu'elle s'est effectuée à pression constante.

gène, se répartissent d'une manière variable dans la constitution chimique des combustibles. Or, la puissance thermique de ces deux corps simples est fort inégale. Tandis que 1 kilogramme d'hydrogène dégage 34462 calories ([1]), en s'unissant à 8 fois son poids d'oxygène pour donner de l'eau, le carbone ne développe que 8080 calories ([2]), en se combinant à 2^{kg},667 d'oxygène pour former de l'acide carbonique ([3]).

Les divers combustibles sont d'après cela susceptibles de pouvoirs calorifiques très divers, et cette appréciation présente évidemment pour l'industrie l'intérêt le plus direct. Aussi a-t-on étudié diverses méthodes destinées à renseigner à cet égard, en vue des achats à effectuer ([4]).

945 — *Méthodes d'essai.* — On peut citer en premier lieu le procédé de Berthier connu sous le nom d'*essai à la litharge*. Il est fondé sur la *loi de Welter*, d'après laquelle le nombre des calories dégagées serait simplement proportionnel au poids d'oxygène absorbé dans la combustion.

La houille finement pulvérisée et intimement mélangée à l'oxyde de plomb est chauffée en vase clos. L'oxygène fixé par les éléments réducteurs laisse en liberté un poids correspondant de plomb métallique, facile à recueillir et à doser directement. Une telle opération est simple, mais fort inexacte. L'erreur peut atteindre jusqu'à 25 et même 35 %.

([1]) Fabre et Silbermann. *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XXXIV, p. 357, et t. XXXVI, p. 5. — Ser. *Physique industrielle*, t. I, p. 21.

([2]) A l'état de charbon de bois fortement calciné.

([3]) Lorsque du moins il se trouve en présence d'un excédent d'oxygène. Si l'excès de l'air reste insuffisant, on n'obtient plus que 2473 calories, en produisant 2^{kg},333 d'oxyde de carbone, par la fixation de 1^{kg},333 d'oxygène.

A son tour *un kilogramme* (et non pas le poids précédent) d'oxyde de carbone peut de nouveau développer 2403 calories, si on le combine avec 0^{kg},571 d'oxygène pour former de l'acide carbonique.

([4]) Mène. Pouvoirs calorifiques des houilles du Nord, du Pas-de-Calais et de la Belgique. *Comptes rendus de la Société des sciences et des arts de Lille*, 3e série, t. VI. — Meunier-Dollfus. Chaleur de combustion de la houille. *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, t. CV, p. 1250. — Pouvoir calorifique des houilles. *Génie civil*, t. III, p. 151. — Ser. Puissance calorifique. *Traité de physique industrielle*, t. I, p. 18. — Commines de Marsilly. *Bulletin de la Société d'encouragement*, 2e série, t. IX, p. 290. — Lavoisier. Expériences sur l'effet comparé de divers combustibles. *Académie des sciences*, 1781.

MM. Scheurer-Kestner et Meunier-Dollfus ont effectué, par la méthode de Favre et Silbermann, de nombreux essais de combustibles.

M. Berthelot a institué une méthode de la plus grande précision, au moyen de sa bombe calorimétrique. M. Mahler l'a rendue plus pratique pour l'industrie, en remplaçant la bombe de platine, qui est d'un prix fort élevé, par un obus émaillé à l'intérieur ([1]).

946 — On a cherché à rattacher directement l'appréciation *a priori* du pouvoir calorifique aux résultats de l'analyse chimique du combustible.

Dulong admettait qu'après défalcation de la portion de l'hydrogène qui correspond, en tenant compte des équivalents respectifs des deux corps simples, au poids d'oxygène enfermé dans la houille, le surplus de cet élément, ainsi que la totalité du carbone, fonctionnent tous les deux comme s'ils étaient isolés, en dégageant individuellement les quantités de chaleur mentionnées ci-dessus (page 536). Si donc c, h, o représentent respectivement les poids de carbone, d'hydrogène et d'oxygène contenus dans 1 kilogramme de houille, on aura pour la quantité de chaleur q que ce dernier est capable de développer :

$$q = 8\,080\,c + 34\,462\left(h - \frac{o}{8}\right);$$

l'erreur pouvant atteindre avec cette méthode 12 à 15 %.

MM. Scheurer-Kestner et Meunier ([2]) ont cru reconnaître qu'il n'y n'y avait pas lieu de distinguer ainsi dans le calcul l'oxygène contenu dans le combustible de celui qui est puisé dans l'atmosphère,

([1]) Mahler (*Bulletin de la Société d'encouragement*, 27 novembre 1891. — *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, 31 novembre et 14 décembre 1891. — *Génie civil*, t. XX, p. 197). — Scheurer-Kestner et Meunier-Dollfus. La chaleur de combustion de la houille déterminée au moyen de la bombe calorimétrique. *Moniteur industriel*, 5 janvier 1892.

([2]) Études sur la combustion de la houille et le rendement des chaudières à vapeur (*Bulletin de la Société industrielle de Mulhouse*, 1858-1874, *passim*, articles réunis en 1875. — *Annales de chimie et de physique*, 6e série, t. XV, p. 262). — Haton de la Goupillière. *Revue des travaux scientifiques*, t. IX, p. 1.

et qu'il était préférable de baser simplement l'évaluation sur la totalité du carbone; ce qui correspond à la formule :

$$q = 8\,080\,c + 34\,462\,h.$$

On reste cependant encore exposé ainsi à des erreurs de 8 à 12 %.

Cornut a été plus loin [1]. Il distingue dans le total c du charbon indiqué par l'analyse élémentaire de la substance, la partie c' qui s'y trouve à l'état de carbone fixe, et à laquelle on conservera le coefficient normal 8080, et, en second lieu, la portion c'' engagée dans diverses combinaisons volatiles, à laquelle il attribue le pouvoir calorifique de la vapeur de carbone 11 214. La formule devient dans ces conditions [2] :

$$q = 8\,080\,c' + 11\,214\,c'' + 34\,462\,h,$$

et l'erreur possible parait se renfermer entre 1 et 7 %.

Ser a proposé [3] une règle empirique qui revient à ajouter le poids de l'hydrogène au tiers de celui du carbone, en multipliant le total par 26 800. Comme il est toujours plus facile d'effectuer une multiplication par 3 qu'une division, nous écrirons de préférence cette formule de la manière suivante :

$$q = 8\,960\,(c + 3\,h).$$

Sauf quelques écarts exceptionnels, elle semble ne pas excéder comme limite d'erreur 2 %.

947 — Le tableau suivant présente, pour les principales classes

(1) Étude sur les pouvoirs calorifiques des houilles (*Société industrielle du nord de la France*, 1887. — 6e *Congrès des Ingénieurs en chef des Associations de Propriétaires d'appareils à vapeur*, 1881). — Haton de la Goupillière. *Revue des travaux scientifiques*, t. VII, p. 421. — *Génie civil*, t. III, p. 151.

(2) Cornut a publié dans son mémoire un tableau de résultats numériques comprenant plus de 150 combustibles divers. On y trouve, en même temps que des désignations géographiques précises, l'analyse élémentaire et le pouvoir calorifique de chacun d'eux.

(3) Ser. *Physique industrielle*, t. I, p. 66.

COMBUSTIBLES	COMPOSITION EN CENTIÈMES						RÉSIDU DE LA CARBONISATION en centièmes		POUVOIR CALORIFIQUE EN CALORIES			
	CARBONE		HYDROGÈNE		OXYGÈNE				ÉTAT SEC ET PUR		ÉTAT ORDINAIRE	
	Minim.	Maxim.	Minim.	Maxim.	Minim.	Maxim.	Minim.	Maxim.	Minim.	Maxim.	Minim.	Maxim.
Bois	48,0	53,0	6,0	6,4	41,0	46,0	30	40	3 600	3 800	2 400	2 500
Tourbe	58,0	64,0	5,6	6,4	30,0	36,0	35	40	4 800	5 600	3 000	3 700
Bois fossile	58,0	68,0	5,0	6,0	26,0	37,0	35	40	4 800	5 600	4 000	4 800
Lignite	70,0	74,0	5,0	5,5	20,0	35,0	40	50	6 000	7 500	5 500	6 600
Houille sèche à longue flamme.	76,0	80,0	5,0	5,5	15,0	20,0	50	60	8 000	8 500	7 200	7 800
Houille grasse à longue flamme.	80,0	85,0	5,2	5,8	8,0	15,0	60	68	8 500	8 800	7 500	8 000
Houille grasse	83,0	87,0	4,8	5,5	8,0	12,0	68	74	8 800	9 300	7 800	8 300
Houille grasse à courte flamme.	87,0	89,0	4,0	5,0	6,0	8,0	74	82	9 300	9 600	8 300	8 600
Houille maigre.	89,0	92,0	3,0	4,0	4,0	6,0	82	90	9 200	9 500	8 000	8 400
Anthracite.	93,0	95,0	2,0	3,5	2,5	4,0	90	92	9 000	9 200	7 800	8 300

de combustibles naturels, les limites de variation entre lesquelles se renferment la composition élémentaire, le résidu en coke et le pouvoir calorifique ([1]), soit qu'on les envisage à l'état de pureté, ou dans des conditions plus ordinaires avec une teneur en cendres de 10 à 12 °/₀ en général.

§ 3

COMBUSTION

948 — *Quantité d'air.* — Nous venons de voir que le générateur doit son activité à la mise en relation de la houille avec l'air dans des conditions telles que le carbone passe directement à l'état d'acide carbonique, sans s'arrêter à celui d'oxyde de carbone, en même temps qu'on ne laissera échapper aucune portion de l'hydrogène, par l'entraînement d'hydrogènes carbonés ([2]).

([1]) On voit, par ces divers chiffres, que celui de 8000 calories fournit, pour les houilles, une sorte de moyenne pratique dont il ne sera peut-être pas inutile de faire ressortir ici la grande importance numérique.

Ce résultat correspond en effet à une capacité de travail de 424×8000, c'est-à-dire 3392000 kilogrammètres. Une telle énergie, en admettant qu'elle fût intégralement employée, serait donc capable de soulever le corps qui en est le siège, contre une pesanteur supposée constante, à une hauteur verticale de 3392 kilomètres (plus de la moitié du rayon terrestre).

Si on l'envisage sous la forme de force vive, elle pourrait imprimer à ce corps une vitesse égale à :

$$\sqrt{2g \times 3392000},$$

ou 8158 mètres (plus de deux lieues par seconde).

On comprend, d'après de tels chiffres, comment la combustion d'une quantité modérée de houille sur les grilles des grands appareils à vapeur suffit à les rendre capables des énormes puissances qu'on est arrivé aujourd'hui à leur demander.

([2]) Henry. *Étude expérimentale de la vaporisation dans les chaudières*, 1889, in-8°. — Buchetti. *Guide pour l'essai des machines à vapeur et la production économique de la vapeur*. Rapport de M. Brull sur cet ouvrage. *Bulletin de la Société d'encouragement*, 3e série, t. XII, p. 337. — Lencauchez. Mémoire sur la production de la vapeur comme origine de force motrice. *Bulletin de la Société de l'industrie minérale de Saint-Étienne*, 2e série, t. XII, p. 91. — Lencauchez et Durant. De la production et de l'emploi de la vapeur (*Mémoires de la Société des Ingénieurs civils*, juin 1890. — *Bulletin de la Société d'encouragement*, 4e série, t. VI, p. 558). — Vinçotte. Expériences sur le chauffage des chaudières. *Bulletin de la Société industrielle d'Amiens*, t. XXIII, p. 152. — Poupardin. Influence de la température de l'air arrivant sous les grilles des générateurs. *Chronique industrielle*, 1890, p. 127. — Meunier-Dollfus. Rapport sur le

La première des conditions nécessaires à cet effet est une température élevée, capable de saisir immédiatement les gaz combustibles au moment de leur distillation, et de les griller au contact de l'oxygène. Autrement la calcination progressive en détruirait une partie tout au moins, avec production d'un dépôt de carbone pulvérulent, qui constitue la fumée et la suie, et devient beaucoup plus difficile à brûler, une fois qu'on l'a laissé se précipiter sous cette forme.

949 — Une seconde condition est la présence de l'air en quantité convenable. La proportion théoriquement nécessaire résulterait dans chaque cas du calcul des équivalents chimiques, en partant des données fournies par l'analyse du combustible. Mais, dans la pratique, ce résultat serait à coup sûr insuffisant, en raison de l'impossibilité de mettre en rapport en chaque point les éléments moléculaires correspondants. En opérant ainsi, on laisserait perdre sans nul doute une grande quantité de produits combustibles.

L'addition d'un certain complément d'air s'impose donc pour réaliser la température maxima. Sa valeur résultera d'ailleurs, non

concours de chauffeurs de 1875. *Bulletin de la Société industrielle de Mulhouse.* — Expériences sur la vaporisation. Morin et Tresca. *Traité des machines à vapeur*, 1863. — Scheurer-Kestner et Charles Meunier. Études sur la combustion de la houille, chez Lacroix, 1875. — Hirsch et Debize. *Leçons sur les machines à vapeur*, t. I, p. 274. — Ser. *Physique industrielle*, t. I, p. 9. — Péclet. *Traité de la chaleur*. — De Mondésir. *Cours de l'École des tabacs sur la production et l'emploi de la chaleur.* — Gruner. *Traité de métallurgie.* — Prideaux. *Traité sur l'économie du combustible.* — Siemens. Conférence sur le combustible (*Revue industrielle*, 18 février 1874, p. 21. — *La Métallurgie*, 1888, p. 749. — *Van Nostrand's engineering Magazine*, décembre 1886, p. 451). — Expériences de Cornut. 4e *Congrès des Ingénieurs en chef des Associations de Propriétaires d'appareils à vapeur*, Rouen, 1881, p. 86. — Bour. *Note présentée à la Société des sciences industrielles de Lyon*, 1877. — Expériences de Geoffroy. Couche. *Voie, matériel roulant, exploitation technique des chemins de fer*, t. III, p. 32. — Chomienne. Étude sur la combustion. *Bulletin technologique de la Société des anciens Élèves des Écoles d'arts et métiers*, novembre 1890, p. 845.

Hudson. Heat transmission in boilers. *The engineer*, 5 décembre 1890, p. 449. — The evaporative efficiency of boilers. *Engineering*, 11 avril 1890, p. 433. — Longridge. The evaporation of Lancashire boilers. *Ibidem* , 11 avril 1890, p. 461. — Desmond Fitz Gerald. Evaporation. *Transactions of the American Society of civil Engineers*, septembre 1886, p. 581. — Steam heating. *Engineering and building record office*, in-8°. — Hoadley. Experiments. *Journal of Franklin Institute*, avril 1877. — W.-J. Williams. Economy of Fuel. *American machinist*, 3 septembre 1881, p. 6. — Rankine. Vaporisation. *Manuel de la machine à vapeur*. Traduction par G. Richard, p. 624 à 642.

plus d'un calcul *a priori*, mais des détails de construction de l'appareil, et notamment du degré de brassage qui en résulte pour les gaz.

Un *brassage* rationnel et très actif de la masse gazeuse constitue en effet une condition essentielle à remplir. Sans cela on verrait s'établir en certains points dans les conduits un régime d'écoulement par filets parallèles, où des courants combustibles chemineraient côte à côte avec des veines d'air presque pur, sans s'y mélanger ni provoquer une réaction mutuelle en temps utile, avant leur déversement commun dans l'atmosphère. Toute combinaison favorable à un brassage énergique tendra toujours à réduire le complément d'air qui est inévitable en pratique, et à rapprocher par suite la température de son maximum.

Ajoutons cependant que, pour sauvegarder la conservation d'appareils délicats, on se voit quelquefois obligé de consentir à un certain abaissement de cette température, en ajoutant un excès proprement dit d'air atmosphérique.

On a indiqué (1) le chiffre approximatif de 12 kilogrammes d'air comme équivalant théoriquement à 1 kilogramme de houille moyenne, en ajoutant qu'il convient pratiquement de l'augmenter de moitié (2). Avec une ventilation favorisée par des moyens artificiels, ce total peut s'abaisser notablement; jusqu'à 9 ou 10 pour les locomotives (3).

950 — *Tirage*. — Les moyens à employer pour fournir au foyer la quantité d'air voulue comportent un moteur et un régulateur.

Le moteur se trouve ordinairement dans le tirage d'une cheminée, dont les proportions doivent être en rapport avec l'importance du massif de chaudières (4).

Pour les locomotives en particulier, la hauteur manque forcément, puisqu'elles doivent pouvoir passer sous les ponts. On y supplée en engouffrant l'air dans le cendrier, en raison du mouvement

(1) W. Rankine. *Manuel de la machine à vapeur*. Traduction de Gustave Richard, p. 299.

(2) Hirsch et Debize. *Leçons sur les machines à vapeur*, t. I, p. 378.

(3) Dubost. *Revue générale des chemins de fer*, février 1891. — Henry. *Troisième session du Congrès international des chemins de fer*, 1889, t. II, question XII, p. 235.

(4) Voy. t. I, p. 484.

relatif dû à la marche du train, et surtout en injectant à la base de la cheminée la vapeur d'échappement, dont la condensation produit sur ce point un certain degré de vide et un appel très énergique.

Avec les foyers fermés (nº 1063), on emploie également des injections de vapeur, et plus souvent encore l'action directe d'un ventilateur mû par la machine (nº 1095).

951 — Quant à la régularisation du tirage, on la demande en premier lieu à une juste proportion des pleins aux vides dans la grille, à travers laquelle l'air est obligé de filtrer en subissant des résistances.

On possède d'ailleurs un moyen de modération variable à volonté dans la manœuvre du ***registre***, qui sert à modifier, suivant les circonstances, l'orifice d'écoulement offert aux gaz par la cheminée (nº 1077).

Ajoutons que c'est surtout dans l'habileté du chauffeur, pour la disposition du charbon sur la grille, que réside le meilleur moyen de régularisation de l'accès de l'air, ainsi que nous le verrons en parlant de la conduite du feu (nº 965).

952 — *Température initiale.* — Il y a lieu d'envisager séparément la température initiale qui est développée dans le foyer, et sa valeur finale, au moment où les divers produits de la combustion, solides ou gazeux, abandonnent l'appareil. La différence de ces deux températures caractérisera, par ses variations, le degré d'utilité que l'on aura réussi à retirer du charbon dépensé. On a donc tout avantage à accroître la première et à diminuer la seconde.

La température initiale due immédiatement à la réaction de l'air sur le combustible, avant toute cession de calorique aux objets étrangers et principalement à l'eau, reste, bien entendu, indépendante du poids de charbon que l'on voudra envisager par la pensée. Et en effet la chaleur fournie par celui-ci varierait en raison de ce poids, en même temps qu'elle se répartit exclusivement, pour le moment, sur les produits de la combustion, qui sont de leur côté

proportionnels à ce même poids. Nous pouvons donc raisonner sur 1 kilogramme en particulier.

L'utilisation pourra dès lors s'exprimer au moyen du quotient de la division du pouvoir calorifique par le coefficient moyen de chaleur spécifique des produits.

Toutefois, dans le numérateur de cette fraction, le pouvoir calorifique doit être diminué des pertes de toutes natures, dont les principales causes sont les suivantes :

1° La production des *escarbilles*, qui tombent sans être brûlées à travers les barreaux de la grille dans le cendrier, et dont la proportion augmente avec la friabilité, l'effritement et la décrépitation du combustible, parfois aussi en raison d'un fourgonnage trop actif de la part du chauffeur [1]; 2° la chaleur sensible emportée par ces escarbilles, ainsi que par la masse des cendres; 3° la précipitation du noir de fumée entraîné dans l'atmosphère, ou fixé dans les suies; 4° l'entraînement des gaz combustibles qui ont échappé à l'oxydation : hydrogènes carbonés ou oxyde de carbone; 5° la température sensible que possède encore l'ensemble de la masse gazeuse au sortir de la cheminée; 6° le rayonnement calorifique au dehors; 7° la conductibilité à travers les massifs. Toutes les mesures qui tendront à réduire ces diverses causes de déperdition seront donc à recommander.

Dans le dénominateur de la fraction, la chaleur spécifique des gaz varie avec la température, contrairement à une opinion autrefois reçue. On peut toutefois admettre comme valeurs approximatives les coefficients suivants pour les divers produits de la combustion :

Acide carbonique	0,217
Azote	0,245
Air.	0,228
Vapeur d'eau.	0,475
Cendres	0,200

Les poids respectifs de ces matières, dont la connaissance est

[1] Quand l'opération en vaut la peine, on tamise les cendres pour en retirer ces escarbilles, qui ont d'ailleurs perdu leurs parties volatiles.

nécessaire pour l'évaluation de la moyenne, se calculeraient aisément d'après les résultats de l'analyse chimique du combustible et l'excédent d'air que l'on aura jugé à propos de faire intervenir.

§ 4

UTILISATION DES FLAMMES

953 — *Température finale.* — La température finale a théoriquement pour limite celle de l'eau dans la chaudière, dont la valeur est connue ([1]) en fonction de la pression de marche. Tant que le courant gazeux reste plus chaud, il semble que l'on puisse encore entreprendre de lui retirer, au profit de l'eau, cette différence. Cependant il y a pratiquement des limites qu'il serait malavisé de vouloir franchir.

D'abord, si l'on mesure cette température à la base de la cheminée et non au sommet, il est nécessaire de lui conserver en ce point une valeur suffisante pour déterminer le tirage; question qui reste d'ailleurs indéterminée ([2]), et comporte un certain degré d'arbitraire, puisque l'on dispose des dimensions de cette cheminée.

Si l'on apprécie la température en un point encore plus reculé vers l'intérieur, près de l'organe proprement dit de vaporisation, il sera bon de se réserver la possibilité d'utiliser sur ce trajet un excédent de chaleur capable de suffire : 1° au séchage de la vapeur pour diminuer le primage ([3]), et même au besoin à sa surchauffe ([4]); 2° à l'échauffement progressif de l'eau d'alimentation dans des réchauffeurs (n° 1108), avant qu'elle pénètre dans les appareils d'évaporation : corps cylindrique, bouilleurs, tubes d'eau ([5]).

([1]) Voy. t. I, p. 771.
([2]) Voy. t. I, p. 489.
([3]) Voy. p. 31.
([4]) Voy. t. I, p. 831.
([5]) Cet échauffement préalable présente, ainsi que nous le verrons plus tard (n° 1108), un double avantage : celui de troubler le moins possible le régime de la vaporisation, au moment où l'on alimente, et en outre de précipiter par la chaleur une partie importante des dépôts en dehors de la chaudière proprement dite, dans des régions où ces matières seront moins nuisibles et plus faciles à enlever.

Dans ces conditions, la limite inférieure que nous fixions tout à l'heure au degré thermométrique de la chaudière, s'abaissera théoriquement à celui de l'eau d'alimentation. Mais, dans la réalité, la nécessité du tirage empêchera d'atteindre des chiffres aussi inférieurs. Nous avons vu en effet ([1]) qu'une température d'environ 300° peut être considérée comme la plus favorable pour le tirage des cheminées.

Il ne faudrait pas d'ailleurs s'exagérer l'intérêt qui peut s'attacher à réduire outre mesure la température finale des gaz. A de tels degrés d'abaissement, elle demeure presque sans action sur l'unité superficielle de tôle, et il deviendrait nécessaire, si l'on tenait à en retirer un résultat appréciable, d'attribuer à la surface de chauffe un développement abusif, qui présenterait de nombreux inconvénients.

954 — *Utilisation des flammes.* — C'est du mode plus ou moins parfait d'utilisation des gaz chauds que dépendra dans chaque cas la valeur finale de la température, dont nous venons de définir le *desideratum*.

La disposition géométrique de la surface de chauffe est loin d'être indifférente à cet égard. Les parois verticales, le long desquelles la flamme s'élève rapidement, récoltent beaucoup moins de calorique que les parties horizontales chauffées par-dessous. On a évalué cette réduction de l'efficacité relative à $\frac{4}{5}$, et même $\frac{2}{3}$.

On distingue les chaudières *à courant direct*, et celles qui sont *à retour de flamme*. Dans les premières, les gaz cheminent à peu près en ligne droite du foyer au pied de la cheminée, et s'y élèvent définitivement. Pour les autres, le courant est ramené à travers d'autres *carneaux* vers le point de départ. On réalise ainsi, pour un même espace superficiel, un plus long trajet du fluide au contact des enveloppes métalliques. Mais ce renversement de sens crée une perte de charge, et provoque un dépôt de suie dans la *boîte à fumée* qui se prête mal au nettoyage. L'allumage se trouve également rendu par là plus lent et plus difficile.

([1]) Voy. t. I, p. 488, note 3.

Quand on emploie le courant direct, il y a intérêt à ouvrir à la base, et non au sommet du carneau, en son extrémité, le conduit d'évacuation des gaz. De cette manière, on force à se rabattre la partie la plus chaude du fluide qui s'est logée spontanément au plafond de ce conduit, et qui s'échapperait directement sans avoir beaucoup servi, si l'orifice qui lui est offert se trouvait lui-même placé à la partie supérieure.

Le mouvement des gaz chauds résulte en effet de deux forces qui en sollicitent les molécules avec une intensité variable suivant les circonstances : leur légèreté spécifique qui les dirige de suite vers le haut, et le tirage de la cheminée qui tend à infléchir leur marche par la voie la plus courte vers le rampant. Ces deux propensions se trouvent placées à angle droit l'une sur l'autre dans les carneaux horizontaux.

Pour le chauffage d'un bouilleur vertical, au contraire, elles s'ajouteront ou se retrancheront directement, suivant que l'on amènera le courant par le bas ou par le haut. Ce dernier mode sera donc préférable, en vue de mieux maintenir le contact de la masse fluide avec l'enveloppe. Lorsque l'on se trouve obligé d'accepter la marche ascendante, on en contrarie du moins la rapidité à l'aide de chicanes.

Il en est de même si le courant chaud doit se bifurquer dans le sens vertical. Comme les deux branches ne sauraient être toujours placées dans des conditions rigoureusement identiques, il s'établira spontanément une tendance au passage du fluide d'une manière prépondérante par l'un des conduits. Si la vitesse est ascendante, cette branche s'échauffant progressivement, l'influence de ses parois tendra à y activer de plus en plus l'écoulement, et à réduire l'autre passage à une stagnation permanente. Au contraire, avec une marche descendante, le courant, en échauffant ses rives, y développe une force ascensionnelle antagoniste, au profit de l'autre passage qui recouvrera peu à peu son activité diminuée. Cette remarque prend beaucoup d'importance pour les réchauffeurs tubulaires (n° 1112).

Quand on dispose plusieurs récipients horizontaux les uns au-dessus des autres, il est bon de les isoler par des cloisons dans

des compartiments distincts, que parcourra successivement le courant. A la vérité, l'on rétrécit par là les sections, en augmentant la vitesse en même temps que le parcours: double motif pour accroître la perte de charge. Mais au moins l'on assure un chauffage meilleur à chacun des récipients, sans quoi celui qui est placé au-dessous se trouverait sacrifié par rapport à l'autre, en raison de la tendance des gaz les plus chauds à se loger au sommet. Pour le même motif, il est préférable, dans chacun des compartiments, d'installer le bouilleur à la partie supérieure, au sein de la température la plus élevée, en laissant en dessous le plus libre passage. Il est défectueux d'établir ce cloisonnement suivant les plans méridiens horizontaux des récipients. Leur partie supérieure se recouvre alors de cendres, qui gênent la transmission du calorique.

955 — *Circulation méthodique.* — Il convient que la marche du courant gazeux se développe dans son ensemble à contresens du mouvement que prend de son côté le liquide à l'intérieur, depuis le point d'arrivée de l'eau froide jusqu'à la région de la volatilisation définitive. Cette dernière doit être rapprochée du coup de feu, afin de recevoir l'impression décisive de la plus haute température. En même temps il est à propos que les gaz abandonnent le contact des parois métalliques au point où l'eau la plus froide agira aussi efficacement que possible, pour achever de les dépouiller de leur chaleur sensible. Ce principe est connu sous le nom de *circulation méthodique*.

L'eau étant par elle-même peu conductrice de la chaleur, il est nécessaire, pour bien utiliser l'échauffement de la tôle, que le liquide ne reste pas immobile au contact des parois. Sans cela, derrière une tranche d'une faible épaisseur qui emprunterait directement la chaleur du métal, la température de la masse ne s'élèverait qu'avec une extrême lenteur. Cette condition, qui s'applique à tous les générateurs, prend une importance toute spéciale pour ceux d'entre eux auxquels on désire communiquer une grande activité sous un faible volume, et auxquels surtout on a besoin d'assurer une *mise en pression* rapide en raison de la nature de leurs ser-

vices ([1]). On les appelle *chaudières à circulation* (nº 1035). Dans ces appareils, une provision d'eau assez limitée se trouve animée de mouvements rapides, en raison du jeu des densités qui résulte de l'échauffement lui-même, et de dispositifs combinés géométriquement en vue de ce résultat.

956 — *Conductibilité.* — La chaleur passe des gaz dans l'eau par la succession de trois phénomènes distincts : 1° transmission du foyer à la tôle par contact direct et par rayonnement; 2° conductibilité à travers l'épaisseur de l'enveloppe; 3° transmission du métal à l'eau par contact immédiat.

La conductibilité à travers la tôle est fort active, et ce passage intermédiaire est très facile ; au point que, contrairement aux idées anciennement reçues, l'épaisseur du métal, aussi bien que sa nature, restent à peu près sans influence sur la transmission définitive.

957 — La communication du calorique entre la chaudière et l'eau, sans être aussi aisée, l'est cependant encore beaucoup plus que celle qui s'opère des gaz au métal.

Mais elle retrouvera un degré de difficulté analogue, quoique encore moindre, si on laisse se former, derrière la paroi, des *chambres de vapeur* ; c'est-à-dire si, de l'autre côté d'une partie léchée par les flammes, il se trouve, non plus de l'eau qui présente une grande densité, mais de la vapeur qui en a fort peu, et ne saurait enlever à beaucoup près autant de calories pendant le même temps.

Un résultat semblable se produit si l'on permet la constitution d'une épaisseur notable de *tartre* sur les parois intérieures (nº 1128), et surtout en cas d'interposition de corps gras (nº 1131). Alors l'échange de chaleur se trouve entravé; la tôle s'échauffe beaucoup plus que dans l'état normal, et peut même rougir. Il en résulte, comme nous le verrons plus tard (nº 1166), une série d'inconvénients et même de dangers.

On doit donc éviter avec grand soin que le *plan d'eau* vienne à

([1]) Pompes à incendie à vapeur, embarcations, etc.

s'abaisser au-dessous de la *ligne des carneaux*, c'est-à-dire de l'intersection de la paroi métallique avec la surface d'intrados des massifs de maçonnerie qui limitent pour elle le contact des flammes. On veillera de même à ce qu'il ne puisse se former sur aucun point de chambre de vapeur accidentelle, en discutant à ce point de vue la forme des surfaces, qui doit permettre partout un dégagement facile et rapide de la vapeur hors du sein du liquide le long des parois. Enfin l'on exécutera fréquemment dans la pratique des nettoyages intérieurs (n° 1146).

958 — C'est la transmission du calorique entre les gaz et le métal qui subit de beaucoup la résistance la plus prononcée, surtout dans les parties qni se recouvrent de suie [1].

La conséquence est que l'enveloppe écoulant facilement dans l'eau les calories qu'elle reçoit avec plus de difficulté de l'extérieur,

[1] On peut établir une relation entre ces trois sortes de conductibilité.

Désignons à cet effet par t_0 la température de la masse gazeuse en un point considéré, par t_1 celle de la pellicule extérieure du métal, t_2 celle de sa surface interne, et t_3 celle de l'eau qui se trouve en contact avec lui. Soient de même q_1 la conductibilité, ou pour mieux dire la convection, c'est-à-dire l'échange calorifique entre le gaz et la tôle, q_2 la conductibilité proprement dite à travers le métal, q_3 l'échange entre celui-ci et le liquide. Ces divers coefficients représentent numériquement la quantité de chaleur qui se trouve transmise, pour une différence de température s'élevant d'un côté à l'autre à un degré centigrade, et en ce qui concerne le second, pour un mètre d'épaisseur.

Le flux de chaleur doit naturellement être le même pour les trois passages successifs, une fois que se trouve atteint le régime de température stationnaire, d'après l'équivalence de la chaleur fournie par les gaz et de celle qui est emportée par la vapeur fournie à la machine motrice. Nous poserons donc l'égalité des trois expressions analytiques qu'il prend l'une après l'autre :

$$(t_0 - t_1)\,q_1 = (t_1 - t_2)\,q_2 = (t_2 - t_3)\,q_3,$$

ce qui peut s'écrire de la manière suivante :

$$\frac{t_0 - t_1}{\frac{1}{q_1}} = \frac{t_1 - t_2}{\frac{1}{q_2}} = \frac{t_2 - t_3}{\frac{1}{q_3}} = \frac{t_0 - t_3}{\frac{1}{q_1} + \frac{1}{q_2} + \frac{1}{q_3}};$$

la dernière de ces fonctions étant obtenue, d'après une règle connue, en ajoutant terme à terme les diverses fractions égales entre elles.

Si donc on appelle encore q le coefficient de *transmission définitive* entre l'atmosphère du foyer et l'eau de la chaudière, lesquelles présentent respectivement les tem-

prend dans toute son étendue une température peu différente de

pératures t_0 et t_3, on pourra encore égaler aux expressions ci-dessus la suivante : $(t_0 - t_3)\, q$, ou bien, sous la seconde forme :

$$\frac{t_0 - t_3}{\frac{1}{q}}.$$

Il en résulte l'égalité :

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{q_1} + \frac{1}{q_2} + \frac{1}{q_3}.$$

En ce qui concerne les valeurs effectives de ces divers coefficients, Clément a effectué divers essais en vue de déterminer la quantité de chaleur transmise à travers une enveloppe en fonte. Il a trouvé que le maximum correspondait à une vaporisation de 100 kilogrammes par mètre carré et par heure. Christian a obtenu le même résultat pour le cuivre. De Pambour est arrivé, pour le fer, au chiffre de 120 kilogrammes, en effectuant la vaporisation à l'air libre, c'est-à-dire à la pression atmosphérique ou à la température de 100 degrés.

Dans cette dernière expérience, le flux de chaleur représentait donc, pour chaque kilogramme d'eau vaporisée :

$$606{,}5 + 0{,}305 \times 100 = 637^{\text{Cal.}},$$

c'est-à-dire, pour le poids total :

$$637 \times 120 = 76\,340^{\text{Cal.}}.$$

Il vient par suite, pour la transmission définitive :

$$q\,(t_0 - 100) = 76\,340.$$

Admettons comme température du foyer : $t_0 = 1000°$ (Ser. *Physique industrielle*, t. I, p. 497) ; il s'ensuivra :

$$\frac{1}{q} = \frac{1000 - 100}{76\,340},$$

$$\frac{1}{q_1} + \frac{1}{q_2} + \frac{1}{q_3} = 0{,}01178.$$

On connaît d'ailleurs directement la conductibilité du fer, qui est 58,82 pour un mètre d'épaisseur, d'après les derniers travaux de Neudstadt et d'Angstrom (A. Witz. *Revue générale des sciences pures et appliquées*, 1892, p. 240). On aura donc, pour une tôle d'un centimètre par exemple :

$$q_2 = \frac{58{,}82}{0{,}01} = 5882\,; \qquad \frac{1}{q_2} = 0{,}00017\,;$$

$$\frac{1}{q_1} + \frac{1}{q_3} = 0{,}01161.$$

Il suffirait par conséquent de la mesure directe de l'un de ces deux coefficients d'échanges extrêmes pour en déduire l'autre. Malheureusement les résultats expérimentaux ne renseignent pas suffisamment, pour le moment, à cet égard.

celle du liquide, laquelle est, d'après la loi de Regnault ([1]), très éloignée de celle des gaz incandescents.

On doit voir là une circonstance fort heureuse au point de vue de la conservation des appareils. Si, par une circonstance quelconque, du genre de celles que nous indiquions tout à l'heure, cet ordre de choses se trouve renversé, et que la transmission soit rendue plus difficile entre la tôle et le liquide, le métal se surchauffe et subit des détériorations profondes, que l'on désigne sous le nom de *coup de feu* (n° 1168). Elles obligent tout au moins à des réparations, et, dans des cas extrêmes, à la mise au rebut des appareils.

§ 5

VAPORISATION

959 — *Vaporisation.* — Une fois la chaleur communiquée à l'eau, celle-ci se convertit en vapeur. La gazéification peut s'opérer dans toutes les parties de la masse, mais il faut toujours que les bulles finissent par se dégager à travers la *surface libre*, de manière à se réunir dans la capacité qui surmonte cette dernière, pour y constituer une atmosphère de vapeur.

Si donc ce plan d'eau est très étendu par rapport à la surface de chauffe, le dégagement pourra s'effectuer tranquillement. Il sera au contraire nécessairement tumultueux, si l'on restreint beaucoup les dimensions du plan d'eau. Or cette circonstance présente une réelle importance, car elle facilite l'entraînement mécanique des particules liquides, ou en d'autres termes le primage, dont nous avons reconnu les inconvénients ([2]).

Une étendue notable de la surface libre ralentit également, en cas de défaut d'alimentation, l'abaissement du plan d'eau, dont nous reconnaîtrons plus tard la gravité (n° 1178).

960 — Le volume liquide renfermé dans la chaudière influence

([1]) Voy. t. I, p. 778.
([2]) Voy. t. I, p. 801, et t. II, p. 34.

également la vaporisation. Il tend à régulariser le phénomène, en répartissant sur une plus grande masse un afflux donné de chaleur. Il forme en quelque sorte *volant* pour les irrégularités de marche du foyer.

Par contre il ralentit la mise en pression. Il présente en outre le défaut de déterminer une perte importante de chaleur, et par suite de combustible, lors de la *mise hors feu* ; inconvénient qui sera surtout sensible avec les machines intermittentes, et beaucoup moins pour celles que l'on n'arrête qu'en vue des nettoyages ou des réparations.

Mais c'est surtout sous le rapport de la sécurité que cet élément exerce une influence décisive. Nous reconnaîtrons plus tard (n° 1158) à quel point il constitue un danger redoutable, en constituant un énorme emmagasinement d'énergie potentielle, capable d'exercer les plus grands ravages, si une explosion de l'enveloppe vient à la mettre subitement en liberté.

L'antagonisme entre ces deux tendances opposées est inhérent à la nature des choses, et ne saurait disparaître. Il déterminera, suivant les circonstances, le choix de l'ingénieur entre les chaudières à corps cylindrique ou les générateurs à petits éléments (n° 1029).

961 — Le volume de vapeur qui surmonte le liquide ne présente pas le même inconvénient, tout au moins à degré égal, à beaucoup près. Et cependant il contribue lui-même à régulariser la pression sous les appels du moteur, variables aux divers instants de la course du piston, et par suite aussi l'ébullition qu'influenceraient ses à-coups. Il diminue donc également le primage.

Pour ce motif, on cherche souvent à augmenter encore ce volume, en adjoignant à la portion du corps de chaudière qui lui est directement affectée, un *dôme de vapeur* additionnel surmontant ce dernier (n° 1101).

962 — *Rendement calorifique.* — Il est facile, d'après ce qui précède, d'apprécier le *coefficient* ε_2 d'*utilisation thermique* (¹) que réalisent les générateurs de vapeur.

(¹) Voy. t. I, p. 600.

Supposons à cet effet qu'un kilogramme de combustible soit capable de développer intégralement 8 000 calories. Si l'on effectue la vaporisation à la tension de 10 atmosphères, c'est-à-dire à la température de 180 degrés, il faudra fournir à chaque kilogramme d'eau :

$$606{,}5 + 0{,}305 \times 180 = 661^{\text{cal}}.$$

On peut d'après cela vaporiser théoriquement :

$$\frac{8\,000}{661} = 12^{\text{kg}},1\,;$$

ce qui représente, pour le coefficient économique thermique de l'opération dans laquelle on volatiliserait 8 kilogrammes d'eau par kilogramme de houille (n° 936) :

$$\varepsilon_2 = \frac{8}{12{,}1} = 0{,}66\,;$$

et pour un résultat de 7 kilogrammes seulement :

$$\varepsilon_2 = \frac{7}{12{,}1} = 0{,}57.$$

On estime que, dans la pratique, ce coefficient varie de 55 à 65 %. On a cependant obtenu des résultats notablement supérieurs quand il s'agit de chauffeurs choisis, qui apportent, en vue d'un concours, une attention exceptionnelle, et disposent de combustibles de choix.

963 — La perfection économique de l'utilisation de la chaleur dans les générateurs est loin d'avoir progressé depuis Watt dans la même proportion que la puissance, aujourd'hui gigantesque, que peuvent atteindre ces appareils. Elle est demeurée à peu près stationnaire, et l'on obtient à l'aide d'un kilogramme de houille environ le même poids de vapeur que réalisait ce grand ingénieur. S'il est vrai que certains détails se sont perfectionnés dans l'intervalle,

on se trouve d'autre part de plus en plus gêné par les emplacements dans les grandes villes, et l'on néglige trop souvent, plus que par le passé, certaines précautions qui permettraient de réduire les pertes de chaleur.

Notons d'ailleurs que, pour ce genre d'appréciation, l'importance très variable du primage [1] jette souvent une certaine incertitude sur le chiffre du rendement calorifique *évalué en eau vaporisée*. Il en est de même quand on n'indique pas si les purges font, ou non, retour à la chaudière (n° 1116).

964 — Il s'est produit ce résultat assez inattendu, et très digne de remarque que, sous ce rapport, les dispositifs les plus différents (en les supposant bien établis et convenablement proportionnés dans leurs diverses parties) arrivent tous à peu près à l'équivalence; contrairement aux assertions des prospectus, dans lesquels chacun annonce uniformément une notable économie sur ses concurrents. Cette illusion résulte souvent des soins exceptionnels, et de la bonne volonté instinctive qui sont apportés par chaque inventeur pour les essais de son propre appareil, tandis qu'il envisage les autres dans les conditions de la pratique courante.

Il semble, d'après cela, que la préoccupation du rendement doive être à peu près écartée, ou du moins reléguée au second plan, quand il s'agit de fixer le choix du type de générateur qu'il s'agit d'adopter.

Mais ce serait en même temps une grande erreur de conclure de là que l'extrême variabilité que présentent aujourd'hui ces dispositifs n'ait pas de raison d'être. Elle est au contraire d'une véritable importance, pour permettre d'adapter dans chaque cas l'appareil à des conditions bien déterminées d'emplacement, de combustible, d'exigences relatives au mode de fonctionnement, etc.; lesquelles conduiront à donner, dans cette appréciation, la prépondérance à telle ou telle propriété à l'exclusion des autres; quelques-unes d'entre elles pouvant même être contradictoires [2].

[1] Voy. p. 34.

[2] Ainsi par exemple que nous l'avons indiqué tout à l'heure en ce qui concerne la régularité et la sécurité (n° 959).

Une discussion générale des divers modèles essentiels de chaudières s'impose donc ici, ainsi que la pondération de leurs avantages et de leurs inconvénients respectifs, suivant les circonstances qui pourront se présenter pour le praticien. Avec des choix faits hâtivement et sans discernement, il arriverait précisément que le type que l'on aurait adopté, capable, moyennant des conditions favorables, de lutter à égalité avec les autres sous le rapport de l'économie, tomberait au contraire dans un fonctionnement déplorable, en perdant tous ses avantages.

§ 6

CONDUITE DU FEU

965 — *Chauffeur.* — Nous venons d'étudier la théorie de la combustion. Il reste maintenant à indiquer les moyens pratiques d'en assurer les *desiderata* (1).

Le *chauffeur* doit être un homme d'une certaine instruction, présentant des garanties suffisantes de moralité, de sang-froid, de sobriété. Son habileté est l'un des facteurs principaux de l'économie du combustible. Dans beaucoup de centres industriels, un enseignement technique est fait aux chauffeurs, et des concours avec primes ont été institués comme moyen d'émulation.

On doit s'attacher à faciliter leur service, sans excéder leurs

(1) Conduite du feu dans les chaudières verticales. *Bulletin technologique de la Société des anciens Élèves des Écoles d'arts et métiers*, mars 1887, p. 211. — Jaunez. *Manuel du chauffeur. Guide pratique à l'usage des mécaniciens, chauffeurs et propriétaires d'appareils à vapeur.* — Cornut. *Cours de chauffeurs*, in-8, Lille, Danel, 1880. — Ledieu, Hubac et Gilbert. *Manuel de l'ouvrier chauffeur de la flotte.* — Couche. *Emploi de la houille dans les foyers Ten-Brink*, in-8°. — Coal waste and some remedies. *The railway Engineer*, avril 1889, p. 120. — Schwackhöfer. Technologie de la chaleur et de l'eau, avec examen spécial de la conduite des chaudières à vapeur. Vienne, in-8°, 1883. — Gautero. *Manuel du machiniste et du chauffeur.* Milan, in-32, 1885. — Zanon. *Conduite des chaudières et des machines à vapeur.* Venise, in-16, 1885. — Beretta. *Istruzioni pratiche de caldaie e macchine a vapore.* Novare, in-16, 1891. — Pizzorno. *Schema di programma per gli esami conduttori di apparecchi a vapore.* Gênes, in-16, 1891. — Sanna. *Manuale dei conduttori di apparecchi a vapore.* Turin, in-16, 1891. — Sinigaglia. *Istruzzione pratiche, per fuochisti, con uni introduzione destinata ai proprietari di caldaie a vapore.* Rome, in-16, 1891.

forces physiques, ni l'intelligence moyenne de leur classe. Ces fonctions sont pénibles. La température qui règne aux abords du foyer a fait donner à cette région le nom d'*enfer* [1]. Pour réduire l'intensité du rayonnement, on laisse une couche d'eau à la sole du cendrier, qui est garnie de fonte ou d'un radier étanche. Cette eau sert à éteindre les escarbilles. Elle forme en même temps un miroir qui permet au chauffeur d'étudier par-dessous la marche de son feu.

966 — Divers instruments : ringards, tisonniers, pinces, pelles, etc. (fig. 570 à 579), sont mis à sa disposition pour piquer le feu, dégager la grille des mâchefers qui l'encombrent, et disjoindre au moment voulu les barreaux. Les houilles grasses, en s'agglutinant, bouchent les passages de l'air, et il est nécessaire de les briser fréquemment. Cette propriété est d'ailleurs utile pour retenir les menus sur la grille. Les houilles maigres conservent leurs formes et leurs intervalles, et l'on doit au contraire éviter de les fourgonner avec excès, de peur d'augmenter la proportion des escarbilles.

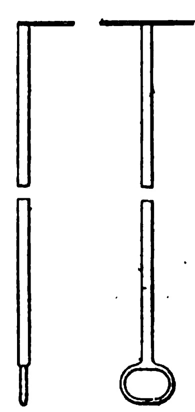


Fig. 570 et 571.
Raclette pour nettoyer la grille (élévations antérieure et latérale).

967 — Le chauffeur manœuvre le registre pour activer ou ralentir le tirage. Un manque d'air produit de la fumée, un trop grand excès provoque le refroidissement. Il ouvre ou referme, suivant les variations de l'allure, les trous d'air que l'on ménage parfois à travers la porte du foyer, en vue d'admettre au moment utile un supplément d'air, destiné à griller les gaz combustibles qui viendraient à distiller en trop grande abondance [2].

Il ouvre et ferme la porte du foyer pour charger le combustible,

[1] Les paquebots qui naviguent dans la mer Rouge affectent souvent, au service des grilles, des nègres, dont le tempérament est presque seul capable de résister à de telles conditions.

[2] On voit parfois, au moment de l'ouverture de la porte du foyer, se former une flamme caractéristique de l'oxyde de carbone, que l'on n'observe plus dans les périodes d'incandescence générale.

travailler le feu ou décrasser la grille. En raison de l'afflux considérable d'air froid qui résulte de ces manœuvres, on doit fermer le registre avant d'ouvrir le foyer, afin de diminuer l'appel (1).

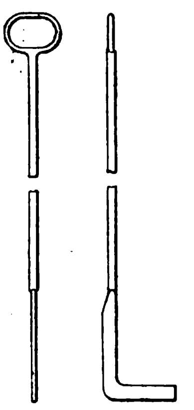


Fig. 572 et 573.
Ringard pour détacher les scories (élévations antérieure et latérale).

968 — *Marche normale.* — Si le feu était abandonné à lui-même, la quantité d'air ne se trouverait presque jamais en rapport convenable avec la phase que traverse à chaque instant la combustion.

Quand on vient de charger du combustible, la grille est encombrée, le charbon s'agglomère s'il est d'une nature collante, l'air filtre difficilement ; et cependant c'est le moment où il en faudrait beaucoup pour griller le flot de gaz combustible qui commence à distiller, avec production de fumée noire.

Vers la fin de la combustion au contraire, le coke se raréfie, les intervalles sont redevenus libres, et l'air passe en grande abondance, au moment où le carbone seul reste en ignition et où toute la partie volatile a disparu ; ce qui devrait inversement motiver une diminution dans l'accès de l'air.

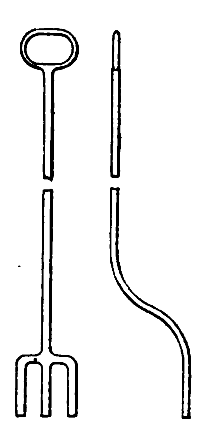


Fig. 574 et 575.
Fourche pour détacher les scories (élévations antérieure et latérale).

Il est donc nécessaire que le savoir-faire du chauffeur remédie à ces tendances par l'habile disposition de son feu.

969 — Un premier principe consiste à charger fréquemment et à petites doses, afin d'atténuer autant que possible les alternatives dont il vient d'être question. Une combustion convenablement dirigée nécessite moins de décrassages, et détermine moins d'usure qu'un régime de coups de collier.

(1) On emploie aussi dans ce but certains procédés mécaniques (n° 1077). Un moyen radical d'écarter ces irrégularités se trouve dans l'emploi des foyers fermés (n° 1063).

Il faut disposer le combustible bien également de manière à uniformiser la filtration de l'air. Tout au plus charge-t-on un peu davantage sur les bords que vers le centre. Les barreaux sont par là soulagés dans leur partie la plus éprouvée par la pesanteur et par la température. En outre les parois se trouvent jusqu'à un certain point protégées. On donne une faible pente de l'avant vers l'arrière de la boîte à feu, pour faciliter le dégagement de l'air dans cette dernière région qui est la plus décisive. On empêche avec soin la formation de cratères, donnant passage à des dards de chalumeau. Il suffit pour cela de jeter de petites pelletées, là où le besoin s'en manifeste.

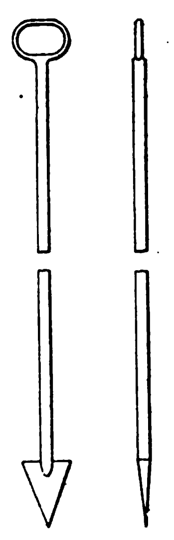


Fig. 576 et 577. Levier pour détacher les barreaux (élévations antérieure et latérale).

On dispose de préférence le combustible frais sur une première zone près de l'entrée, de manière à obliger tous les produits de sa distillation à passer au-dessus de la région incandescente et oxydante. Puis l'on repousse vers l'arrière le charbon ainsi préparé par une demi-combustion, avant d'effectuer un nouveau chargement à l'avant. On opère autant que possible ce refoulement en dessous de la masse embrasée, afin d'assurer l'oxydation des dernières parties volatiles, et de ne pas amortir la température superficielle, qui détermine l'intensité du rayonnement vers la chaudière.

Il ne faut pas perdre de vue que cet ensemble de précautions, utile pour la bonne marche du foyer, est en contradiction avec l'intérêt instinctif du chauffeur, qu'il assujettit à des manœuvres plus fréquentes et plus pénibles que ne le serait un chargement en grand sur une épaisseur importante. Il l'oblige également à de fréquents nettoyages de grille, principa-

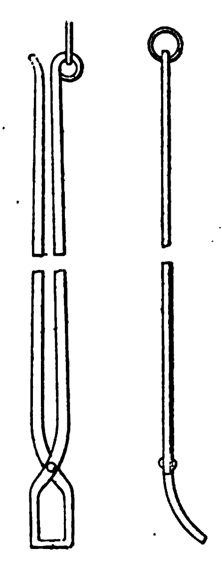


Fig. 578 et 579. Pince pour détacher les barreaux (élévations antérieure et latérale).

lement à l'arrière, où il est surtout essentiel d'assurer le libre accès de l'air, pour griller au passage tous les éléments combustibles du courant. Il est donc bon, par des primes d'économie, d'intéresser cet ouvrier à un bon résultat.

970 — Dans les moments où l'on veut pousser davantage le feu, l'on ouvre un plus grand accès à l'air et l'on augmente la charge. Ordinairement, pour les chaudières fixes, on passe 40 à 60 kilogrammes de houille demi-grasse par mètre carré de grille et par heure, et dans la marine, 80 à 100 kilogrammes. Ces chiffres augmentent avec le tirage artificiel. On dépasse, pour les locomotives, celui de 400 kilogrammes ([1]).

Les charges se répartissent sur 0 m. 12 à 0 m. 20 d'épaisseur pour le tout-venant, et jusqu'à 0 m. 30 avec des gaillettes de bonne qualité. On se tient entre 0 m. 20 et 0 m. 25 pour le coke ; 0 m. 25 et 0 m. 30 pour le bois et la tourbe.

971 — *Mise en feu, mise hors feu.* — Pendant un arrêt momentané de la machine ([2]), on ferme le registre et l'on ouvre les portes du foyer. On retire au besoin du combustible. Si les soupapes viennent à souffler (en raison de l'accumulation de calories qui n'a plus pour contre-poids l'appel de vapeur par le cylindre), on soulage l'une d'elles.

Quand on approche de la mise hors feu normale, on diminue progressivement les charges. Au moment final, on couvre le feu de cendres, on ferme le registre et les portes. Le chauffeur ne doit quitter sa chaudière qu'après avoir constaté la baisse graduelle et décisive du manomètre.

Pour remettre en marche, on ouvre le registre, puis les portes. On tisonne le feu, et l'on charge du combustible frais.

Quand il s'agit d'une première mise en feu, on intercale, entre la grille et la houille froide, des copeaux, des fragments de fagots ou de bois résineux, que l'on enflamme par-dessous au moyen d'un paquet de chiffons gras allumés, présentés à l'extrémité du pique-feu.

([1]) *Troisième section du Congrès international des chemins de fer*, t. II, question XII. — M. Pechar cite une consommation de 800 kilogrammes (*Gläser's annalen*, 1884).

([2]) Cornut. *Refroidissement des générateurs pendant les arrêts* ; 1881, in-8°.

CHAPITRE LIV

CONSTRUCTION DU CORPS CYLINDRIQUE

—

§ 1

MATÉRIAUX

972 — *Cuivre, laiton.* — Les métaux qui interviennent dans la construction des chaudières à vapeur sont le fer, l'acier, la fonte, le cuivre et le laiton.

Ce dernier n'est employé que pour la fabrication des tubes, et dans la robinetterie.

On en fait également en cuivre rouge, mais ce métal sert surtout pour les parois du foyer des locomotives [1]. On a complètement renoncé à son emploi pour les corps cylindriques, depuis qu'il a été reconnu que la conductibilité, par laquelle il se recommandait, reste sans influence appréciable sur le résultat de la vaporisation (n° 956). Il convient d'ajouter que la résistance du cuivre fléchit rapidement avec la température, et que ce métal est d'un prix élevé.

973 — *Fonte.* — La fonte, qui a joué autrefois un rôle important dans la fabrication des chaudières, a presque disparu de cette branche d'industrie à la suite de nombreux accidents. On n'y a plus recours que pour certaines pièces spéciales, de fabrication difficile, telles que le trou d'homme, les têtes de bouilleurs, etc.

[1] En Amérique on leur substitue souvent l'acier pour cet emploi.

On se sert à cet effet de fonte très douce, coulée en sable. Une fonte dure casserait au rivetage destiné à l'assembler à la tôle; opération qui exige des précautions particulières [1]. La tendance actuelle est d'éliminer complètement la fonte, comme une substance éminemment dangereuse, spécialement dans les parties exposées à des variations brusques de température, sujette à se fissurer d'une manière d'abord peu visible, et à rompre sans prévenir.

974 — *Fer.* — On distingue le fer *doux*, capable de subir à froid des déformations notables, le fer *aigre* qui se gerce et se crique quand on le travaille à froid, et le fer *rouverain* qui, assez doux à froid, prend de l'aigreur à chaud. Le premier seul peut convenir pour la confection des chaudières. Quand elle doit périr, une tôle douce se déchire progressivement, et souvent elle prévient en temps utile. Un métal aigre vole subitement en éclats. C'est surtout pour les tôles de coup de feu et les pièces embouties qu'il est essentiel d'employer des fers de qualité. D'une manière générale d'ailleurs, l'économie qui résulterait de l'achat de tôles inférieures serait peu sensible et bien mal entendue, si l'on réfléchit aux dangers et aux responsabilités qu'elle ferait encourir. On rejette les fers qui ont une cassure lamelleuse à facettes ou à gros grains. On préfère une texture finement grenue ou une cassure à fibres longues.

Ou doit se tenir en garde contre les défauts d'homogénéité du métal qui sont : les fissures, à peine visibles d'abord et s'aggravant rapidement; les pailles, qui résultent d'une intercalation de scorie, laquelle transmet mal la chaleur et peut déterminer des soufflures; la dessoudure ou le dédoublement des tôles, après un laminage défectueux.

975 — La résistance de la matière à l'extension s'apprécie à l'aide d'éprouvettes de 300 millimètres de longueur, sur lesquelles on marque deux traits espacés de 200 millimètres. C'est sur cet intervalle que l'on mesure l'allongement proportionnel, comprenant

(1) Keller. Conditions de résistance des fonds plats circulaires des appareils à vapeur *Annales des mines*, 1886, 1er sem., p. 346. — Assemblage de la tôle et de la fonte. *Ibidem.*, 1887, 1er sem., p. 183; 1888, 2e sem., p. 516.

l'influence de la striction. La limite d'élasticité doit atteindre environ 15 kilogrammes par millimètre carré; la résistance à la rupture 28 kilogrammes comme minimum de rigueur, et jusqu'à 40; l'allongement, pour le moins 5 %, et jusqu'à 30 %. On essaye également la douceur à l'aide du pliage, qui doit pouvoir s'effectuer bord à bord sans crique ni gerçure.

La résistance d'une tôle n'est pas la même suivant les deux côtés de la feuille. Elle surpasse, dans le sens du laminage, d'environ 10 % celle de la direction perpendiculaire. Pour former le corps cylindrique, on doit toujours cintrer dans le sens du laminage; jamais en travers.

La résistance du fer varie peu avec la température jusqu'aux environs de 200°. Elle a même semblé, dans les essais de Fairbairn, augmenter légèrement jusqu'à cette limite, pour diminuer ensuite rapidement. Cette circonstance est assez favorable, puisque la température de l'eau ne dépasse pas pratiquement ce chiffre (¹).

976 — *Acier*. — L'emploi de l'acier pour la construction des générateurs a été très discuté, mais il a des partisans convaincus, et semble avoir pour lui l'avenir (²). Il est toutefois bien essentiel

(¹) De Maupeou. Étude relative à l'action de la chaleur sur les parois des chaudières. *Mémorial du Génie maritime*, 1889, p. 221. — Kollmann. *Sur la résistance du fer à chaud*, Berlin, in-4°, 1880.

(²) Vinçotte. Emploi de la tôle d'acier pour la construction des chaudières. *La Métallurgie*, 1889, p. 457. — Tresca. Procès-verbal des expériences faites sur la résistance des tôles en acier fondu pour chaudières. *Annales du Conservatoire*, 5ᵉ série, t. XIX, p. 345. — Cornut. Emploi de l'acier dans les chaudières. — Haton de la Goupillière. *Revue des travaux scientifiques*, t. IX, p. 2. — Cornut. *Comparaison des tôles des diverses forges*, Lille, 1888, in-8°. — Rémaury. Note sur l'emploi dans les chaudières à vapeur des tôles en métal fondu. *Mémoires de la Société des Ingénieurs civils*, 1888, p. 768. — Considère. *Annales des ponts et chaussées*, 1886. — Couche. *Annales des mines*, 5ᵉ série, t. XIX, p. 311. — *Annales industrielles*, 17 février 1889, p. 202. — *Quatrième Congrès des Ingénieurs en chef des Associations de Propriétaires d'appareils à vapeur*, p. 77. — *Cinquième Congrès*, p. 12. — *Sixième Congrès*, p. 57. — *Septième Congrès*, p. 7, 9, 21. — *Treizième Congrès*, p. 189.

Chaudières d'acier. *American machinist*, 5 décembre 1885, p. 4. — Boiler Steel, Materiel and Tests. *The railway Engineer*, janvier 1890, p. 13. — Steel Boilers. *The railroad Gazette*, 1878, p. 160 et 174. — David Philipps. On the comparative endurance of iron and mild steel when exposed to corrosive influences. *Van Nostrand's Engineering Magazine*, t. XXX, p. 188. — The Steel Boiler of the Livadia. *Engineering*, 15 avril 1881, p. 378. — Greig and Eyth. Experiments referring to the use of iron and steel in high-

d'éviter à cet égard tout malentendu, et de définir avec précision la signification de ce mot en vue de cette application spéciale. On doit entendre par là, non pas le métal trempé, dur et cassant dont ce seul nom éveillait autrefois l'idée, mais au contraire un métal fondu, capable de se souder, et non susceptible de trempe. Il peut toutefois devenir aigre par un brusque refroidissement (1), ainsi que par une succession de chaudes. Il est bon pour ce motif de le travailler en une seule fois, en s'aidant au besoin des appareils hydrauliques d'étampage et d'emboutissage. On se sert souvent de maillets de bois pour le travail à la main, et l'on cesse de marteler quand le rouge a disparu. On ne peut compter d'une manière absolue sur le recuit pour rendre, à coup sûr, à une tôle aigrie toutes ses propriétés primitives.

L'acier coulé renferme des soufflures qui ne disparaissent pas toujours au laminage. Toutefois il présente une homogénéité bien plus satisfaisante que celle des fers en paquets. Chimiquement l'acier de chaudière peut être considéré comme du fer presque pur.

Sa résistance est moindre que celle d'un métal susceptible de trempe. Cette propriété et la douceur, qui est caractérisée par l'allongement proportionnel, suivent en effet une gradation inverse. On perd en résistance en gagnant en allongement. La résistance à la rupture ne dépasse pas, dans cette application, 50 kilogrammes. Le service de la marine militaire a fixé le chiffre de 42 kilogrammes, avec 26 °/₀ d'allongement, et la condition de rester doux après la trempe. Un acier dur serait plus résistant, mais il ne pourrait supporter sans gerçures des déformations notables.

§ 2

CORPS CYLINDRIQUE

977 — *Corps cylindrique.* — La forme de la capacité offerte à

pressure Boilers. *Proceedings of the Institution of mechanical Engineers*, juin 1879 p. 268. — Parker. Experiments in the use of thick steel Boiler plates. *Van Nostrand's Engineering Magazine*, septembre 1885, p. 200.

(1) Pour ce motif, on doit se préoccuper des variations brusques de température dues à l'ouverture en grand de la porte du foyer, ou à l'alimentation avec l'eau froide

la vaporisation est toujours celle d'un cylindre de révolution terminé par deux fonds.

Les plus grands portent le nom de *corps cylindrique*. Leur diamètre, qui est ordinairement compris entre 1 et 2 mètres, a été poussé exceptionnellement jusqu'à 5 mètres. La longueur dépasse rarement 10 mètres. Elle a cependant quelquefois approché de 20 mètres.

Si nous faisons abstraction des fonds, la surface de chauffe est proportionnelle à la circonférence de la section droite, c'est-à-dire au diamètre, et le volume à l'aire de cette section, ou au carré du diamètre. Le volume d'eau rapporté au mètre carré de surface de chauffe croît donc lui-même en raison du diamètre. C'est par conséquent aux chaudières grosses et courtes que correspond la plus grande régularité de fonctionnement, mais en même temps, par compensation, le plus grand danger (n° 1029). Ajoutons que l'épaisseur des tôles doit augmenter en même temps que le diamètre (n° 989), et, avec elle, le poids et le prix de premier établissement. Aussi donne-t-on en général la préférence, à volume égal, à des chaudières plus allongées et d'un moins fort calibre.

Des récipients d'une forme analogue, mais de dimensions moindres, portent le nom de *bouilleurs* (n° 1003), ou de *réchauffeurs* (n° 1108), suivant leurs fonctions. D'autres, appelés *tubes* (n° 1019), ont un diamètre incomparablement plus réduit, qui ne se compte plus qu'en centimètres.

Nous nous occuperons dans ce chapitre du mode de construction du corps cylindrique.

978 — *Viroles.* — On le compose de *viroles* successives, c'est-à-dire d'anneaux assemblés en prolongement les uns des autres, à l'aide de *rivures* circulaires (n° 984). Chaque virole est formée d'une feuille de tôle que l'on a soin (n° 975) de cintrer dans le sens du laminage, en réunissant ses bords par une clouûre rectiligne.

Si la circonférence de section droite excède les dimensions de la tôle, on réunit ensemble plusieurs feuilles au moyen de rivures multiples disposées suivant les génératrices. On doit alors se borner

autant que possible à deux feuilles, pour ne pas multiplier les points faibles; et il est bon de les prendre inégales, afin que la plus grande des deux puisse embrasser la totalité de la surface baignée par les flammes, de manière à placer les clouûres au-dessus de la ligne des carneaux, pour les soustraire à l'action directe du feu.

979 — L'assemblage des viroles bout à bout peut se faire suivant deux modes distincts. Le plus naturel consiste à construire deux séries, paire et impaire, de cylindres dont les rayons diffèrent entre eux de l'épaisseur même de la tôle, de manière que chacun d'eux emboîte les deux tronçons adjacents, ou soit emboîté par eux.

Mais ce système a l'inconvénient de présenter une série de crans, et de briser la flamme qui lèche la surface extérieure avec une grande rapidité. En outre il contribue à retenir de petites flaques d'eau dans ces divers redans, au moment de la vidange du générateur; d'où une influence oxydante très nuisible.

Pour ces motifs on préfère ordinairement le mode *télescopique*, dans lequel toutes les viroles sont identiques et légèrement tronconiques, enfilées les unes dans les autres de manière à tourner leur petite base du côté du foyer. De cette manière on ne brise plus la flamme, et l'on obtient, au moment de vider la chaudière, un écoulement continu au moyen d'une légère inclinaison de l'axe.

980 — *Fonds.* — On a employé à diverses époques, pour les générateurs, des fonds hémisphériques, en calotte sphérique, en anse de panier, ou des fonds plats.

Les fonds hémisphériques ne sauraient atteindre un diamètre considérable. On a cessé de les faire en fonte, pour les composer de fuseaux rivés ensemble.

Les calottes sphériques sont parfois assemblées au corps cylindrique à l'aide de fers cornières et de boulons. Ce mode de construction est dangereux et doit être absolument écarté [1].

La vraie solution consiste dans l'emboutissage d'une feuille

[1] Emploi des fers d'angle dans la construction des chaudières à vapeur. *Revue industrielle*, 4 février 1886, p. 58. — Witmens. Emploi des fers d'angle pour la construction des générateurs. *Annales des travaux publics de Belgique*, t. XLII, p. 207.

unique de tôle suivant une surface de révolution, qui présente comme méridienne une *anse de panier*. Le grand rayon de courbure de cette dernière est ordinairement double de celui de la section droite. On donne la plupart du temps à cette tôle un surcroît d'épaisseur. Cependant M. Collignon estime [1] que l'inverse serait plus logique, en vue d'éviter la raideur de cette partie, et de lui permettre de suivre avec plus de facilité les déformations de l'enveloppe dues aux dilatations, pour ne pas fatiguer cet assemblage si important.

Les fonds plats doivent être écartés en thèse générale, comme n'offrant par eux-mêmes qu'une résistance tout à fait insuffisante. Ils sont cependant à peu près inévitables dans certaines parties des générateurs. Mais on a soin alors de leur donner une épaisseur supérieure à celle du corps cylindrique d'au moins moitié, et surtout de les renforcer par des armatures appropriées.

981 — *Armatures*. — On admet sous le nom de plaque tubulaire des fonds plats pour les corps de chaudières tubulaires. Ils se trouvent alors tout naturellement contreventés par les tubes eux-mêmes qui y sont assemblés. Dans les grands générateurs, on entretoise de même les fonds à l'aide de tirants intérieurs.

Les lames d'eau qui environnent le foyer, pour en empêcher l'irradiation et en recueillir la conductibilité, sont comprises entre deux feuilles planes et parallèles que l'on réunit à l'aide d'entretoises d'un diamètre double, en général, de l'épaisseur de la tôle, espacées de 0 m. 12 à 0 m. 30 et même davantage, suivant leur importance. On communique ainsi à l'ensemble une raideur incomparablement supérieure à celle d'une simple tôle.

Parfois ces entretoises sont creuses et perforées à leur extrémité située du côté du foyer, en restant pleines à l'autre bout. Dans ces conditions, si l'une d'elles vient à se rompre, un jet d'eau jaillit sur le feu et l'éteint. Le chauffeur se trouve ainsi averti de l'accident, qui risquerait sans cela de passer inaperçu. Il pourrait en survenir d'autres semblables dans cette région déjà affaiblie, et cette succes-

[1] *Annales des ponts et chaussées*, mai 1891.

sion d'avaries préparerait un désastre, sans que l'on pût le prévoir en temps utile ([1]).

Le ciel du foyer des locomotives est suspendu par des boulons à une série de poutres transversales, qui portent sur les parois du foyer et sont espacées d'un décimètre environ.

Des goussets de forme triangulaire servent à réunir les parties planes avec les parois cylindriques. On leur donne une disposition rayonnante autour de l'axe.

D'une manière générale, il est bon d'emboutir sur leurs bords les fonds plats, pour faciliter leur rivetage avec le corps cylindrique; c'est ce que l'on appelle *bords tombés.*

982 — *Dilatations.* — On doit, dans ces constructions complexes, apporter une attention spéciale à ne contrarier que le moins possible les dilatations. Leur puissance est extrême ([2]) ; et il est facile de le comprendre, si l'on remarque que l'acier se dilatant d'environ 1 millième pour 100 degrés de température, et exigeant d'autre part, dans la traction directe, un effort de 20 kilogrammes par millimètre carré pour prendre à froid un tel allongement, l'amplitude des variations thermiques des chaudières déterminera des tensions supérieures à ce chiffre.

Si l'on arrive à lutter contre la nature des choses en s'obstinant à réparer, dans les mêmes conditions, une chaudière avariée par le jeu des dilatations, on voit reparaître des criques aux mêmes endroits, jusqu'à ce que, par une modification appropriée, on ait rendu l'élasticité nécessaire.

Les armatures destinées à consolider les maçonneries leur sont souvent plus nuisibles qu'utiles, et disloquent les massifs, en raison des différences de dilatation du métal et de la brique. Il convient pour ce motif de les disposer à l'extérieur.

En ce qui concerne les parties métalliques de la construction, il faut se rendre compte à l'avance de la manière dont les pièces tra-

([1]) Entretoises tubulaires de Yarrow (*Engineering*, 7 novembre 1890, p. 544).

([2]) On connaît l'expérience du redressement des murs du Conservatoire des arts et métiers par la rétraction de tirants métalliques, préalablement chauffés et boulonnés à l'extérieur des parois qui avaient pris des inclinaisons inverses.

vailleront sous l'influence de la chaleur, pour éviter de faire tourmenter les assemblages, avec formation de gerçures aux clouûres ou en pleine tôle ([1]).

On remarquera par exemple que la dilatation du foyer est plus grande que celle du corps cylindrique. Dans les chaudières de Cornouailles (n° 1010), le foyer intérieur se dilate plus que l'enveloppe extérieure. Les tubes de laiton s'allongent plus que les génératrices de la tôle. Ils pousseront donc le centre de la plaque tubulaire, dont celle-ci retient les bords. La partie inférieure du corps cylindrique, qui est baignée par les flammes, s'échauffe plus que le dessus, qui est plein de vapeur. Le générateur, d'abord rectiligne, a par conséquent une tendance à s'arquer et à porter inégalement sur les appuis, ce qui est un grave inconvénient. Les chaudières à petits éléments (n° 1029) se trouvent placées, sous ce rapport, dans des conditions plus favorables que les grands cylindres de tôle.

§ 3

RIVURES

983 — *Soudure.* — On peut employer deux méthodes pour réunir bord à bord les feuilles de tôle : la soudure ou le rivetage.

Une soudure parfaite serait une excellente solution du problème, supprimant les divers inconvénients des rivures. Cependant ce procédé se répand peu, en raison des grandes difficultés que l'on rencontre pour une bonne exécution.

984 — *Lignes de rivets.* — Les *rivures* sont également appelées *clouûres* ou *coutures* (fig. 580, 581).

L'opération du *rivetage* consiste à superposer les bords des deux feuilles, et à percer de part en part des trous disposés en file. On y passe alors des *rivets* dont une tête est déjà préparée. On *rive*

([1]) De Maupeou. Étude relative à l'action de la chaleur sur les parois des chaudières. *Mémorial du Génie maritime*, 1889, p. 221.

l'autre, soit à froid, soit à chaud, dans les conditions générales de l'industrie. Mais, pour la construction des chaudières en particulier, on emploie toujours le travail à chaud.

Un semblable alignement constitue évidemment une partie faible, et détermine dans la tôle une ligne de moindre résistance (¹). Il existe à cet égard deux tendances opposées, suivant lesquelles on emploie ou bien un nombre restreint de gros rivets, espacés en conséquence, ou bien une quantité plus considérable de petits rivets très rapprochés. Le premier mode est plus favorable à la résistance, le second à l'étanchéité.

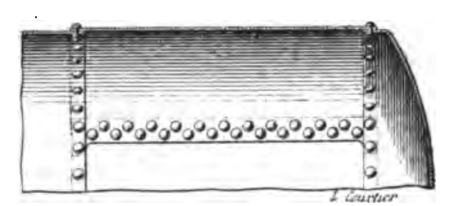


Fig. 580. — Clouûre (élévation).

Il est facile d'ailleurs d'augmenter le nombre des trous, sans sacrifier au même degré la solidité de leur alignement. Il suffit pour cela de les disposer sur deux files parallèles, en croisant les trous en zigzag. On a même établi souvent trois files parallèles de rivets. La distance de ces lignes ne doit pas être inférieure aux 2/3 de l'intervalle des rivets.

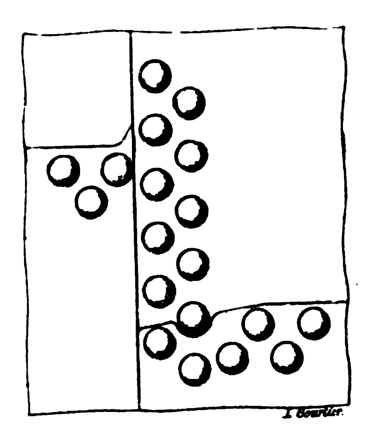


Fig. 581. — Clouûre (développement)

985 — *Tôles*. — Pour compenser l'affaiblissement, on donne quelquefois aux tôles une surépaisseur suivant une zone marginale.

L'épaisseur la plus convenable pour une bonne exécution du rivetage est d'un centimètre. On ne doit pas perdre de vue à cet égard que cet élément n'est pas lié à la pression d'une manière absolue,

(¹) On ne peut mieux les comparer qu'aux lignes de trous que l'on pratique tout exprès dans le papier des timbres-poste, des chèques, etc., pour en assurer la déchirure exactement suivant la direction voulue.

car le diamètre du corps cylindrique exerce sa propre influence sur la solidité de l'ensemble (n° 989).

Il est toujours utile de se procurer des tôles de dimensions aussi grandes que possible, afin de diminuer l'exagération du développement des rivures et l'affaiblissement qui en résulte, ainsi que l'augmentation de poids de l'ensemble, et celle du prix de revient.

Les feuilles sont coupées à la cisaille, et chanfreinées à la raboteuse, de manière à présenter sur leurs bords un biseau, ou plan incliné.

986 — *Trous.* — Il est indispensable que les trous se correspondent très rigoureusement dans les deux feuilles. Tout travail de retouche à l'alésoir laissera du vide ou créera des œillets oblongs, aussi nuisibles à la solidité qu'à l'étanchéité. Pour ce motif, il est préférable de les forer après le cintrage, de manière à être sûr qu'aucun dérangement ne proviendra plus du fait de cette dernière opération.

On peut percer les trous à la poinçonneuse. Mais ce mode de travail leur donne une forme légèrement conique, et surtout il écrouit le métal aux environs de l'orifice, en altérant profondément ses propriétés. Il est préférable de les percer au foret, pour conserver à la tôle toute sa qualité. Quelquefois on les poinçonne sur un diamètre trop faible, que l'on agrandit ensuite au foret. Mais un grand nombre de cahiers des charges exigent que les trous soient forés à la mèche, et proscrivent l'usage du bédane. Il convient tout au moins, après le poinçonnage, d'effectuer un recuit.

Il est bon également d'arrondir légèrement l'arête vive, dont l'effet serait défavorable à la résistance du rivet.

987 — *Rivets.* — Le meilleur métal pour la confection des rivets est un fer doux à grain fin.

La tige présente à froid un diamètre inférieur d'environ 5 $^0/_0$ à celui de l'ouverture, pour tenir compte de l'effet produit par la dilatation, lorsqu'on la présentera à chaud.

On donne à la tête diverses formes (fig. 582, 583, 584) : conique,

hémisphérique, en *goutte de suif*. Parfois on fraise les bords de l'ouverture, et la pièce se trouve entièrement arrasée.

Le rivetage se fait au rivoir qui donne la tête conique, ou à la *bouterolle* pour les têtes en goutte de suif. Toutefois l'emploi des machines est plus expéditif. Par cela même, la riveuse contribue à

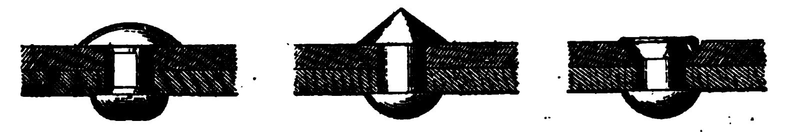


Fig. 582, 583, 584. — Rivets.

mieux remplir le trou, en utilisant plus complètement la chaleur du rivet avant sa déperdition.

Un matage soigné est indispensable, puisque le refroidissement opère le retrait du métal qui a été posé et travaillé à chaud. On effectue également le matage du chanfrein des tôles, pour assurer l'étanchéité.

988 — *Couvre-joints.* — La rivure la plus simple se fait par la simple juxtaposition des bords. Mais ce mode présente l'inconvénient de la tendance au gauchissement, les deux forces de traction exercées par les tôles constituant, dans l'état naturel, un couple qui produira le déversement du système (fig. 585).

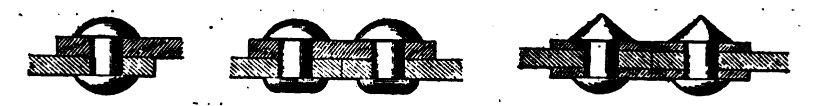


Fig. 585, 586, 587. — Rivures.

On évite cet inconvénient par l'emploi du couvre-joint (fig. 586), et surtout du double couvre-joint (fig. 587).

Les couvre-joints sont particulièrement nécessaires pour les rivures exposées à l'action des flammes, afin d'empêcher celles-ci de s'insinuer entre les deux feuilles. Il faut d'ailleurs toujours employer pour les tôles de coup-de-feu des dimensions qui per-

mettent de reculer la première clouure au moins à un 1 mètre de l'autel (n° 1074).

Dans les parties verticales, les rivures doivent tourner vers le haut le bord en saillie, afin qu'il ne gêne pas l'ascension des flammes.

§ 4

ÉPAISSEUR DE L'ENVELOPPE

989 — Pour établir le corps cylindrique dans des conditions de solidité qui présentent toute garantie, il convient d'examiner successivement, non pas assurément tous les modes de rupture possibles, car ils peuvent varier à l'infini d'après des circonstances fortuites, mais ceux que la symétrie indique *a priori* comme les types les plus simples, autour desquels il y a chance de voir graviter tous les autres.

On aura soin de les combiner autant que possible de manière à embrasser par la pensée des maxima de surface sollicitée par la pression, en même temps que des minima de zones de séparation. Il devient dès lors très probable que si ces types spéciaux de rupture sont rendus impossibles par l'emploi d'épaisseurs suffisantes, il en sera de même de modes plus complexes, affectant des superficies plus restreintes, et s'effectuant suivant des contours plus ou moins sinueux.

Après avoir ainsi calculé un certain nombre de valeurs, qui n'ont *a priori* aucune raison d'être égales entre elles, on adoptera pour la construction la plus grande de toutes, qui sera par cela même capable de parer à tous les modes de rupture envisagés.

990 — Cherchons en premier lieu l'épaisseur qu'il est nécessaire de donner au corps cylindrique, pour l'empêcher de rompre par les fonds.

Nous appellerons e cette dimension, et R la résistance que l'on se propose de demander au métal *par unité de surface*, c'est-à-dire *par mètre carré*. Cette *fatigue* devra, bien entendu, rester fort

éloignée de la véritable *résistance à la rupture* dont est capable le métal poussé à outrance; le rapport de ces deux valeurs constituant le *coefficient de sécurité* que se fixe arbitrairement la prudence du constructeur.

Supposons que la chaudière se sépare en deux tronçons suivant un plan de section droite. La couronne mise à nu pourra être exprimée approximativement par πDe, en raison de la petitesse relative de l'épaisseur e vis-à-vis du diamètre intérieur D. La force d'adhérence qui retient chaque tronçon au contact de l'autre a donc pour valeur :

$$\pi DeR.$$

Nous devons l'égaler à la résultante des pressions qui sollicitent l'une des deux nappes considérées. Cette force sera, d'après la symétrie, dirigée suivant l'axe de figure. Or nous avons vu ([1]) que son intensité s'exprime au moyen du produit de la pression rapportée à l'unité de surface et de la projection de l'aire courbe sur un plan perpendiculaire à cette direction. Cette projection sera le cercle $\frac{\pi D^2}{4}$, aussi bien pour la surface d'extrados que pour celle d'intrados, si nous continuons à négliger l'influence de l'épaisseur. En appelant N le timbre de la chaudière, c'est dire la différence de pression de l'intérieur à l'extérieur exprimée en kilogrammes par centimètre carré, 10 000 N représentera ce même effort pour l'unité de surface, et la résultante en question aura comme valeur :

$$10\,000\,\mathrm{N} \cdot \frac{\pi D^2}{4}.$$

Si nous écrivons l'égalité de ces deux expressions, nous en déduirons la valeur cherchée :

$$e = \frac{2\,500\,\mathrm{ND}}{\mathrm{R}}. \tag{1}$$

([1]) Voy. t. I, p. 10.

991 — Envisageons actuellement l'hypothèse d'un éventrement longitudinal suivant un plan méridien, et cherchons, comme seconde valeur e', l'épaisseur qui serait capable de s'opposer à ce nouveau genre de rupture.

Nous pouvons négliger ici, pour obtenir plus de simplicité dans les formules, le supplément de résistance que procurent les fonds. Cet appoint devient en effet relativement peu considérable pour les générateurs d'une longueur importante; et d'ailleurs cette omission volontaire exercera son influence dans un sens favorable à la solidité.

La surface d'adhérence sera dès lors composée de deux rectangles de longueur L et de largeur e'. La force de ténacité aura donc pour expression :

$$2\,\mathrm{L}e'\mathrm{R}.$$

Quant à la résultante des efforts dus aux tensions, elle sera dirigée suivant la perpendiculaire au plan de séparation; égale par conséquent au produit de la pression effective 10 000 N et de la projection de la surface d'intrados, laquelle est un rectangle de dimensions L et D. Nous aurons d'après cela comme valeur :

$$10\,000\,\mathrm{NLD}.$$

En égalant entre elles ces deux expressions, il vient :

$$e' = \frac{5\,000\,\mathrm{ND}}{\mathrm{R}} \tag{2}$$

On remarquera la relation :

$$e' = 2\,e.$$

Elle nous montre que *la tendance à la rupture suivant les génératrices est double de celle qui provoquerait la séparation des fonds* (1). Suivant l'observation générale qui a été présentée ci-dessus, c'est donc la valeur e' qu'il y a lieu d'adopter.

(1) Pour tenir compte de cette circonstance, on compose souvent d'une seule ligne de rivets les clouures transversales, et de deux files celles qui sont longitudinales.

992 — Il convient même de la majorer encore pour tenir compte de l'affaiblissement proportionnel occasionné par les lignes de rivures; influence bien importante, car ce rapport peut dépasser la moitié [1].

Désignons à cet effet par d le diamètre des trous, et par a la distance de deux centres consécutifs. Sur cet intervalle a, on a enlevé deux rayons, c'est-à-dire d. Il reste donc comme partie pleine $a - d$, et la tôle se trouve affaiblie dans le rapport :

$$(3) \qquad m = \frac{a - d}{a}.$$

C'est par conséquent suivant le rapport inverse que l'on devra augmenter l'épaisseur calculée, en prenant :

$$(4) \qquad e'' = \frac{a}{a - d} e'.$$

Ajoutons toutefois que, la plupart du temps, on passe cette correction sous silence, en la confondant, ainsi que les effets accessoires, dans le coefficient de sécurité d'après lequel se trouve fixée la valeur adoptée pour R.

993 — On voit par ces diverses formules que, à égalité de pression, l'épaisseur de la tôle doit être proportionnelle au diamètre. C'est ce qui explique cette apparente contradiction, que des tubes de faible épaisseur puissent être employés pour amener un même fluide à des récipients que l'on est obligé de prendre au contraire très épais, parce qu'ils sont très gros.

Toutefois, dans l'application, il convient d'ajouter à cette expression théorique un terme constant, destiné à servir d'appoint en vue de diverses causes accidentelles et fortuites, et tout particulièrement de l'usure. On ne saurait évidemment admettre, pour les petits calibres des tubes, que l'épaisseur puisse tendre vers zéro en même temps que le diamètre. Il convient pratiquement de se limiter à un certain chiffre dans ce décroissement.

(1) Couche. *Voie, matériel roulant, exploitation des chemins de fer*, t. III, p. 123.

L'usage est de prendre cette constante égale à trois millimètres, en posant :

$$e''' = e'' + 0{,}003.$$

994 — Nous pouvons nous servir de cette équation pour contrôler l'ancienne formule réglementaire renfermée dans l'ordonnance du 22 mai 1843, et aujourd'hui tombée en désuétude, depuis que le décret du 25 janvier 1865 a rendu aux constructeurs toute liberté à cet égard sous leur propre responsabilité (n° 1187).

Cette formule est la suivante [1] :

$$\varepsilon = 0{,}003 + 0{,}0018\,\mathrm{ND}.$$

Si nous identifions les deux valeurs, en faisant abstraction du coefficient de rivure $\frac{1}{m}$, il vient :

$$\mathrm{R} = \frac{5\,000}{0{,}0018} = 2\,777\,777,$$

ce qui représente 2 kg. 78 par millimètre carré. Cette fatigue est extrêmement modérée pour des fers de bonne qualité. A la vérité elle concerne ici une question d'une gravité exceptionnelle. Elle correspondrait à un coefficient de sécurité d'un dixième, pour un métal présentant une résistance à la rupture de 28 kilogrammes par millimètre carré.

[1] Avec les unités que nous avons adoptées ici. La formule officielle rapporte l'épaisseur au millimètre, le diamètre au mètre, et introduit la pression *absolue*.

Un grand nombre de formules semblables ont été édictées par divers services, tant pour la France qu'à l'étranger. On en trouvera une énumération fort étendue dans les excellentes *Leçons sur les machines à vapeur* de MM. Hirsch et Debize, t. I, p. 834, et dans le *Traité des machines marines* de M. Bienaymé, p. 444. On peut consulter en outre les sources suivantes : Règles proposées pour le calcul des épaisseurs de chaudières. *Annales industrielles*, 1886, t. I, p. 782. — Règles proposées pour le calcul des épaisseurs des tôles de fer pour les chaudières neuves. *La Métallurgie*, 1888, p. 1087. — Alban Gros. Note sur le calcul des chaudières. *Génie civil*, t. XIX, p. 210. — Résal. Sur la résistance des chaudières elliptiques. *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, p. 997. — The Strength of short boilers. *Engineering*, 17 avril 1891, p. 468.

§ 5

DIMENSIONS DES RIVURES

995 — La résistance d'un rivet se déterminera par la condition que son cisaillement rencontre la même difficulté que l'arrachement des deux demi-intervalles de tôle qui lui sont adjacents. Ce dernier effort a pour expression $(a - d)\, e''\, R$, c'est-à-dire (4) $a\, e'\, R$, ou enfin (2) :

$$5\,000\, \mathrm{N}Da.$$

Désignons par S la fatigue de cisaillement rapportée à l'unité de surface, c'est-à-dire la fraction arbitraire que l'on juge à propos, d'après le coefficient de sécurité adopté, de mettre en jeu sur la résistance totale à la rupture par cisaillement dont est capable le métal [1]. La section du rivet est $\frac{\pi d^2}{4}$. La force en question sera donc [2] :

$$\frac{\pi d^2}{4} S.$$

En égalant entre elles ces deux valeurs, il vient :

$$\pi d^2 S = 20\,000\, \mathrm{N}Da.$$

Telle est la relation qui unit les deux éléments d et a de la clouûre.

[1] Pour un même fer, à défaut d'essai direct de l'échantillon, on admet comme résistance au cisaillement, les 4/5 de celle qu'il oppose à l'arrachement par traction. Toutefois, dans les rivures, la supériorité du métal employé pour les goupilles sur celui de la tôle tendrait à rapprocher de l'égalité les deux coefficients.

[2] Nous opérons ici suivant les usages reçus. Il serait toutefois plus exact de rapporter à la résistance au cisaillement acceptée *a priori*, non pas la fatigue *moyenne*, mais la fatigue *maximum*, qui donne une idée plus exacte du danger. Celle-ci est supérieure d'un tiers à la première pour une section circulaire. Il y aurait donc lieu de remplacer dans la formule finale S par $\frac{3}{4} S_0$, en attribuant à ce symbole S_0 la valeur numérique que l'on consent à mettre réellement en jeu comme fatigue de cisaillement.

On pourra donc se donner l'un d'eux arbitrairement, et déduire de là le second.

Il sera peut-être plus clair de prendre ici comme arbitraire le rapport m d'affaiblissement de la tôle, et de calculer le diamètre du rivet en remplaçant a par sa valeur déduite de l'équation (3) :

$$a = \frac{d}{1-m}.$$

Il vient ainsi :

$$d = \frac{20\,000\,\mathrm{ND}}{\pi(1-m)\mathrm{S}} = 6\,369\,\frac{\mathrm{ND}}{(1-m)\mathrm{S}}.$$

996 — Comme il est évidemment désirable d'affaiblir le moins possible la tôle, c'est-à-dire d'augmenter m, on voit que l'on a intérêt à faire croître d, et par suite proportionnellement a; en un mot à employer *un nombre restreint de gros rivets très espacés*, ainsi que nous l'avons énoncé ci-dessus (p. 570).

On se conforme en effet à cette règle dans les grandes constructions métalliques. Cependant, en ce qui concerne spécialement l'établissement des chaudières, on ne saurait, d'autre part, perdre de vue la nécessité de l'étanchéité, qui ne peut s'accommoder d'un trop grand espacement entre les points de la couture, propre à laisser bâiller les intervalles sous l'effort de la pression intérieure.

Il règne sur cette appréciation une assez grande variabilité, manifestée par la multiplicité des formules pratiques qui sont usitées dans les divers ateliers [1]. L'une des plus simples consiste à donner aux rivets un diamètre double de l'épaisseur des tôles qu'il s'agit de réunir, et à leur distance d'axe en axe le triple de leur diamètre.

[1] Hirsch et Debize. *Leçons sur les machines à vapeur*, t. I, p. 875 à 878. — De la Harpe. Étude sur les rivures de tôle. *Génie civil*, 8 novembre 1884, p. 24. — Contamin. *Cours de résistance appliquée*; rivures, p. 63, 85. — Reuleaux. *Le Constructeur*; rivures, p. 178. — Gollner. Résistance des rivures. *La Métallurgie*, 20 mai 1891, p. 765. — Ermel. *Album d'éléments et organes de machines*. — Règles à adopter pour l'écartement des rivets. *Cinquième Congrès des Ingénieurs en chef des Associations de Propriétaires d'appareils à vapeur*, Lyon, 1881, p. 14. — Rivure du cuivre. *Engineering*, 24 avril 1891, p. 497. — Rivures. *Ibidem.*, 4 décembre 1891, p. 664. — Allen. Rivures, *Scientific American, supplement*, 18 juillet 1891, p. 12952. — Barnet Le Van. Riveted

997 — La méthode précédente ne tient pas compte d'un élément important, mais encore trop peu connu pour que l'on puisse le faire figurer explicitement dans le calcul. Son omission n'influence d'ailleurs le résultat que dans un sens favorable à la solidité.

Je veux parler du frottement intense qui s'oppose au glissement mutuel des tôles, et qui par conséquent soulage d'autant les rivets contre le cisaillement. Ce frottement provient du serrage provoqué par la tendance à la rétraction longitudinale de la tige, qui a été posée à chaud, et ne peut plus ensuite changer de longueur pendant le refroidissement.

On ne doit pas d'ailleurs chercher à exagérer cet effet par un surchauffement des rivets, car on risquerait alors d'approcher de la limite de rupture de la tôle par écrasement; laquelle est considérable du reste, et à peu près double de la résistance à l'arrachement par traction.

Il y a lieu également de penser que ce que l'on gagnerait par là se perdrait en partie pour la solidité du rivet, ainsi placé dans un état de tension défavorable à sa conservation. Cette fatigue présente ce caractère particulièrement fâcheux, qu'elle n'est même pas en rapport avec le travail que l'on demande à la chaudière, puisqu'elle subsiste alors même que celle-ci se trouve sans pression.

joints in boilers shells. *Institution of civil Engineers*, Meeting de novembre 1890, p. 252. — Maberly. Account of form tests of riveted joints for boilerwork. *Van Nostrand's Engineering Magazine*, janvier 1884, p. 50. — Kennedy. Report upon Experiments on double riveted joints. *Proceedings of the Institution of mechanical Engineers*, avril 1885, p. 198.

CHAPITRE LV

CHAUDIERES A CORPS CYLINDRIQUE

—

§ 1

GÉNÉRALITÉS

998 — On doit, dans la construction des générateurs à vapeur, s'attacher à concilier autant que possible un grand nombre de *desiderata* distincts, et parfois même opposés : sécurité; économie, aussi bien en ce qui concerne le premier établissement que le rendement quotidien; régularité du régime, diminution du primage, facilité de la conduite du feu, des nettoyages intérieurs ou extérieurs et des réparations; rapidité de la montée en pression, etc.

Suivant que, d'après les circonstances, quelqu'une de ces préoccupations vient à dominer sur les autres, les grandes lignes du projet se modifient en conséquence, et l'on arrive à parcourir toute la gamme des appareils les plus dissemblables dans leur disposition générale. C'est assez dire que la classification des générateurs peut être établie d'après bien des points de vue divers. Le plus convenable paraît devoir reposer sur la considération qui prime toutes les autres, celle de la sécurité.

999 — Or nous avons déjà indiqué que, si les chances de rupture peuvent affecter tous les types, elles sont loin d'entraîner dans chaque cas les mêmes conséquences. L'étendue du désastre dépend alors directement de l'accumulation d'énergie potentielle qui se trouve ainsi subitement rendue à la liberté (n° 1158),

c'est-à-dire tout à la fois du poids de l'eau échauffée et de son degré de caléfaction. Aussi verrons-nous plus tard (n° 1187), que la réglementation publique a basé ses diverses catégories sur la valeur numérique d'un produit de facteurs dépendant de ces deux éléments.

Mais en fait le degré d'échauffement, quoique intéressant directement l'épaisseur des enveloppes, n'en modifie pas le *facies* général à beaucoup près autant que l'importance du volume d'eau que l'on veut leur faire contenir. C'est donc dans ce dernier élément qu'il convient de chercher en ce moment la caractéristique d'après laquelle nous disposerons ici les divers générateurs suivant un ordre rationnel.

1000 — Nous rangerons dans un premier groupe les *chaudières à corps cylindrique*, qui renferment un maximum de liquide sous un minimum de surface de chauffe (chap. LV), et dans une seconde catégorie les *chaudières tubulées* qui, en sens inverse, contiennent peu d'eau, tout en présentant une superficie très développée (chap. LVI).

Les générateurs à corps cylindrique se répartissent eux-mêmes en trois classes. On peut d'abord les chauffer uniquement par le dehors (*chaudière à foyer extérieur*); ou bien enfermer la flamme dans le sein du liquide, à travers un ou deux gros conduits (*chaudière à foyer intérieur*); ou enfin donner à ce principe toute sa valeur en faisant traverser l'eau par les gaz chauds au moyen d'un très grand nombre de petits tubes, de manière à multiplier autant que possible les surfaces de transmission pour une masse donnée (*chaudière tubulaire*).

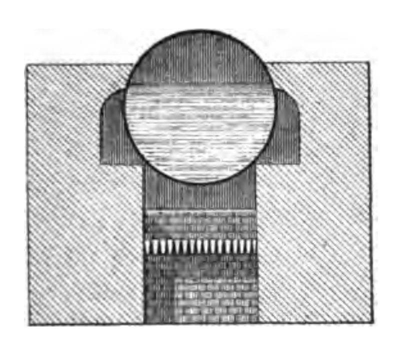
§ 2

CHAUDIÈRES A FOYER EXTÉRIEUR

1001 — Parmi les générateurs à foyer extérieur, le plus simple est composé uniquement d'un corps cylindrique. Ce dispositif est dérivé de la *chaudière à tombeau* de Watt, qui était également cylindrique, mais avec des contournements dont rien ne

ustifiait l'utilité, et qui auraient pu difficilement résister aux pressions actuelles (¹). On leur a, pour ce motif, substitué depuis longtemps la section circulaire, qui est infiniment préférable. En effet, en raison de la constance de sa courbure et de celle de la pression intérieure, elle constitue pour un système flexible la forme d'équilibre stable.

Le corps cylindrique est chauffé directement, ou à retour de flamme. Dans ce dernier cas (fig. 588), une cloison sépare les car-



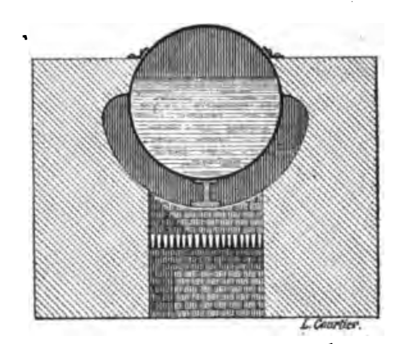


Fig. 588 et 589. — Chaudière cylindrique (coupe transversale).

neaux supérieurs du conduit inférieur. Avec le premier dispositif (fig. 589), la section offerte au courant embrasse la totalité de la surface de chauffe.

La grille (n° 1078) est placée à l'avant du corps de chaudière et au-dessous. Cette combinaison présente le défaut d'exposer à la chaleur la plus intense la surface inférieure, dans laquelle se réunissent les dépôts, qui risquent ainsi d'être calcinés. Au-dessous de la grille se trouve le cendrier (n° 1074), dans lequel tombent les cendres et les escarbilles. Sa porte sert à régler l'accès de l'air qui s'élève à travers les barreaux. Un registre placé dans le rampant, ou dans la cheminée, complète les moyens de réglage (n° 1077).

La ligne des carneaux se trouve à la hauteur du centre de la

(¹) Les chaudières de Papin, de Savery étaient sphériques. Cette forme est la plus irrationnelle de toutes, car la sphère (au moins lorsqu'elle est complète) est la surface qui renferme un volume donné sous la moindre superficie possible.

section, ou lui est un peu supérieure. D'après les règlements ([1]), le niveau de l'eau ne doit jamais s'abaisser à moins de 6 centimètres au-dessus de cette ligne (nº 1178).

Le dôme de prise de vapeur (nº 1101) est placé à l'extrémité opposée au coup de feu, en vue de diminuer l'entraînement d'eau qui proviendrait d'une ébullition tumultueuse. Cet appendice est destiné à relever aussi loin que possible de la surface liquide le point de captage de la vapeur. Pour sécher celle-ci, on la ramène parfois à travers un tube dans toute la longueur de la chaudière, jusqu'à la région du coup de feu qui est la plus chaude.

Pour permettre les visites intérieures, un *trou d'homme* (nº 1098) de dimensions suffisantes permet l'entrée du corps cylindrique. Il est, pendant la marche, fermé par un *autoclave.*

Des orifices de moindre dimension servent pour l'alimentation (chap. LIX) et la vidange (nº 1144). Les différents appareils de sûreté (chap. LXIII), ainsi qu'une tubulure d'attente pour le manomètre mobile d'épreuve (nº 1189), sont installés en divers points de l'enveloppe.

1002 — L'ensemble de l'appareil se trouve compris dans des massifs importants de maçonnerie de briques, renforcés par des angles en pierre de taille, ou par des armatures en tôle avec tirants extérieurs (nº 982), pour l'affermir contre l'influence des dilatations et de la poussée des voûtes. L'importance de ces maçonneries diminue le rayonnement. L'interposition de gaines d'air entre doubles massifs est très efficace contre la conductibilité ([2]). Cette masse sert en même temps de régulateur de température; mais par cela même elle ralentit la mise en feu, et apporte quelque entrave aux coups de collier. Les joints doivent être bien pleins, pour pré-

([1]) Article 10 du décret du 30 avril 1880.
Cette hauteur est de 10 centimètres pour les appareils de navigation (art. 21 du décret du 9 avril 1883; art. 34 de l'ordonnance du 17 janvier 1846).

([2]) Pour empêcher le rayonnement, on établit sur les parties qui ne se trouvent pas à des températures excessives, des revêtements calorifuges analogues à ceux des cylindres (Voy. p. 40). Parfois aussi l'on enterre la chaudière sous les scories; mais ce procédé n'est pas à recommander, car il est de nature à entretenir l'humidité et à développer la rouille.

venir les rentrées d'air froid, ou l'écoulement des gaz chauds par la voie la plus courte vers la cheminée. Il est utile, pour le même motif, qu'une surveillance attentive garantisse contre les fendillements et les crevasses [1].

Il y a lieu également de suspecter les contacts de la construction et du métal. Il peut en effet s'établir sur ces points des suintements qui entretiennent une humidité capable de corroder le métal. A certains intervalles, on a soin de démolir et de reconstruire les enveloppes de maçonnerie : on choisit notamment pour cela le moment du renouvellement de l'épreuve réglementaire (n° 1189), en vue de permettre la visite minutieuse des surfaces métalliques.

§ 3

CHAUDIÈRES A BOUILLEURS

1003 — *Chaudières à bouilleurs.* — Le défaut essentiel du système précédent est sa faible surface de chauffe par mètre cube d'eau. On y a remédié par l'adjonction de *bouilleurs* [2].

On désigne sous ce nom [3] des corps cylindriques assez semblables au premier quant à leur forme et à leur mode de construction, mais sensiblement plus petits comme rayon, et quelquefois, comme longueur. Leur diamètre ne doit cependant pas descendre au-dessous de $0^m,50$ afin de conserver la possibilité des visites intérieures. On le prend souvent égal à la moitié de celui de la chaudière.

(1) Étude sur la pénétration de l'air à travers les maçonneries des générateurs. *Septième bulletin de l'Association de Propriétaires d'appareils à vapeur du Nord de la France*, Lille, 1880, p. 85.

(2) Les *chaudières à bouilleurs* sont quelquefois appelées *chaudières françaises*, parce qu'elles sont particulièrement répandues dans notre pays.

(3) On emploie également l'expression de *bouilleurs-réchauffeurs* pour désigner les appareils que nous appellerons simplement *réchauffeurs* (n° 1108) afin d'éviter toute confusion, car leur destination est très différente. Ils servent à ramener progressivement l'eau froide à une température voisine de celle de la chaudière; mais, à l'inverse des *bouilleurs-vaporisateurs*, auxquels nous réserverons le nom de *bouilleurs*, ils ne doivent pas opérer l'ébullition et la vaporisation.

Le bouilleur est entièrement plongé dans le courant brûlant, qui n'échauffe au contraire que la portion inférieure du corps principal. Cette circonstance, jointe à la diminution de diamètre, augmente sensiblement la surface de chauffe par mètre cube de liquide.

L'une des deux têtes au moins doit être percée d'un trou d'homme en vue de la surveillance. Un grand nombre de chaudières alsaciennes sont munies de bouilleurs qui en traversent toute la longueur, et présentent des trous d'homme aux deux bouts. Ordinairement il n'y en a qu'à l'extrémité la plus éloignée du foyer, et l'on fait cette tête en fonte épaisse, malgré les inconvénients et les dangers que présente ce métal. Le fond exposé au coup de feu est formé d'une feuille de tôle emboutie.

Au-dessus des bouilleurs règne une voûte peu cintrée, ou un système de trois petites voûtes juxtaposées. Les parements latéraux épousent autant que possible la courbure du métal, pour mieux utiliser le courant gazeux. Cependant la surveillance doit rester possible dans cette région.

On donne aux bouilleurs une légère inclinaison, en vue de prévenir la formation de chambres de vapeur le long de leur arête supérieure.

Quelquefois ils reçoivent le coup de feu, afin de moins surchauffer la tôle du corps cylindrique, en cas d'abaissement anormal du niveau d'eau. Le plus souvent ils sont placés dans le retour de flammes, ce qui est plus conforme au principe de la circulation méthodique (n° 955). La première disposition présente d'ailleurs l'inconvénient d'exposer à la plus violente température la partie dans laquelle les dépôts ont une tendance naturelle à se rassembler par la gravité. En outre, elle détermine une ébullition tumultueuse au sein de ces organes, qui n'ont que d'assez difficiles communications avec la surface libre du liquide.

L'alimentation s'y fait directement en général, pour ne pas troubler la température du corps cylindrique, qui forme le laboratoire définitif de la vaporisation.

1004 — Les bouilleurs sont assemblés au corps principal au

moyen de deux *cuissards* ou *culottes* (¹). On désigne sous ce nom

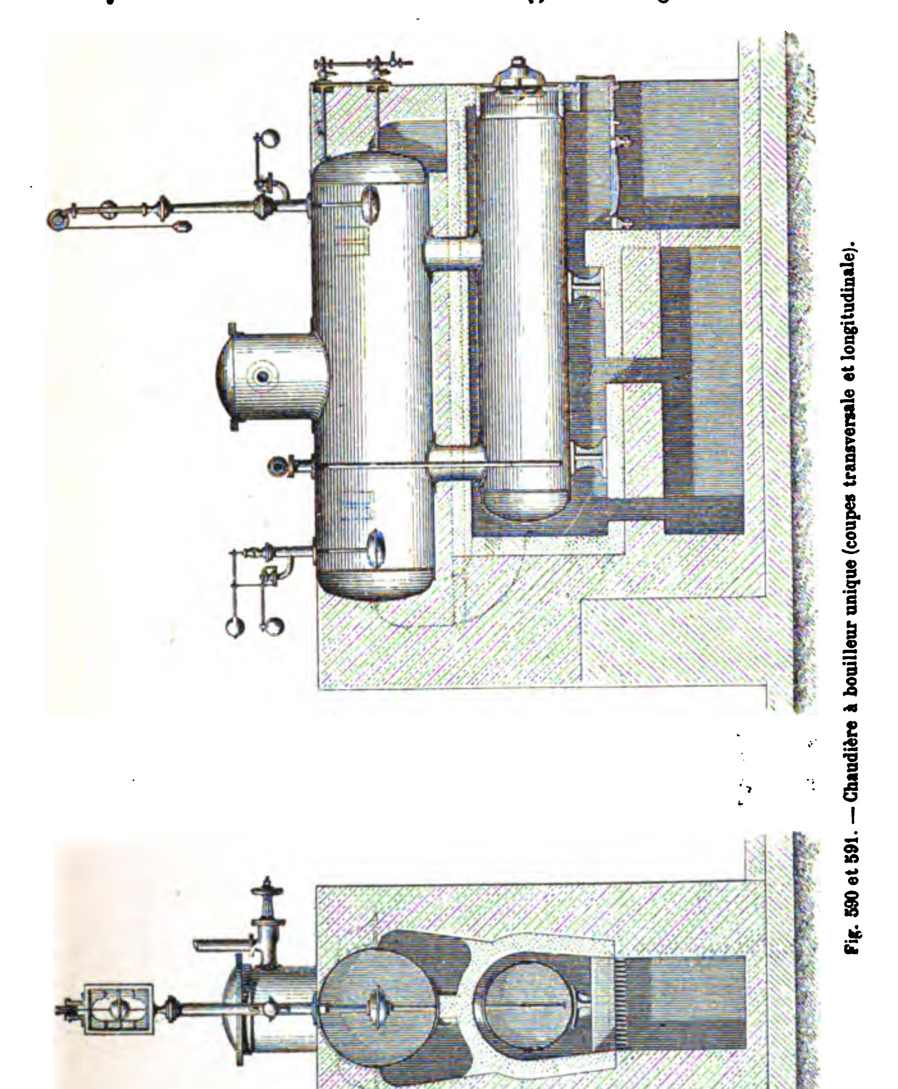


Fig. 590 et 591. — Chaudière à bouilleur unique (coupes transversale et longitudinale).

des tuyaux très courts, de $0^m,30$ environ de diamètre, présentant

(¹) Dans la chaudière Artige, les cuissards sont supprimés. Des tuyaux apparents, en fer ou en cuivre, établissent la communication au dehors du massif de maçonnerie.

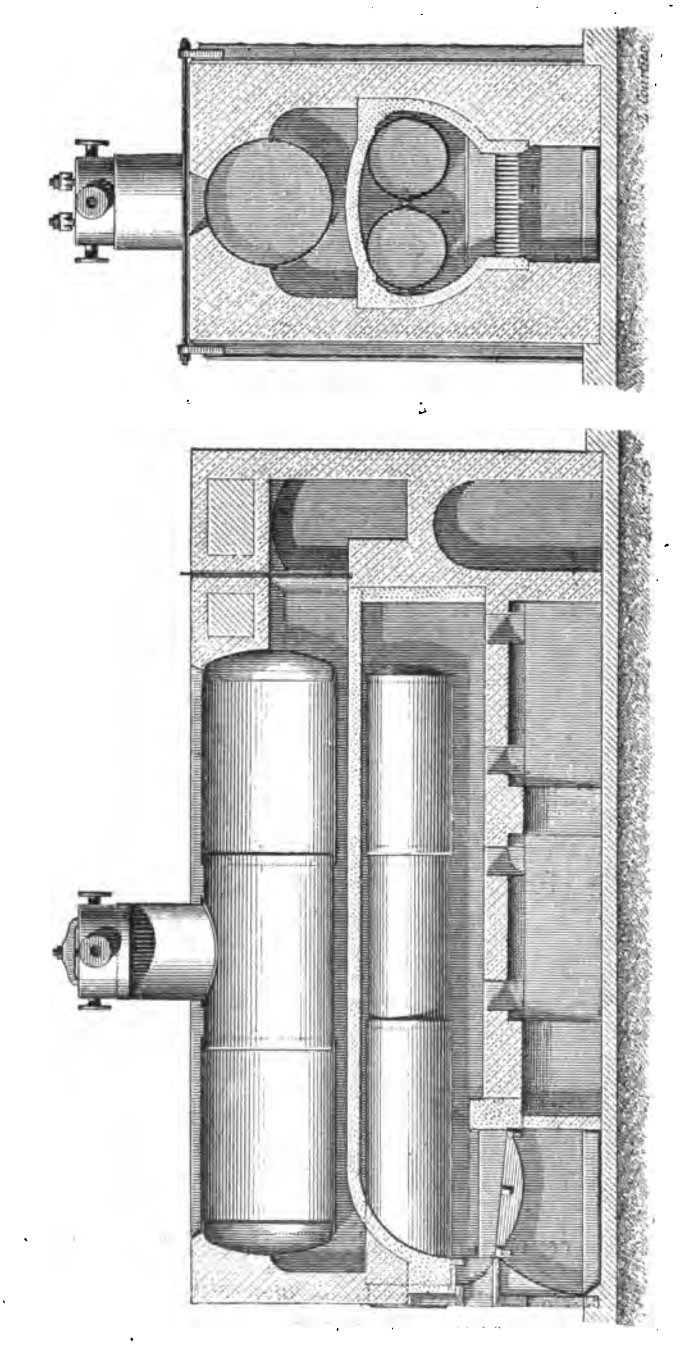


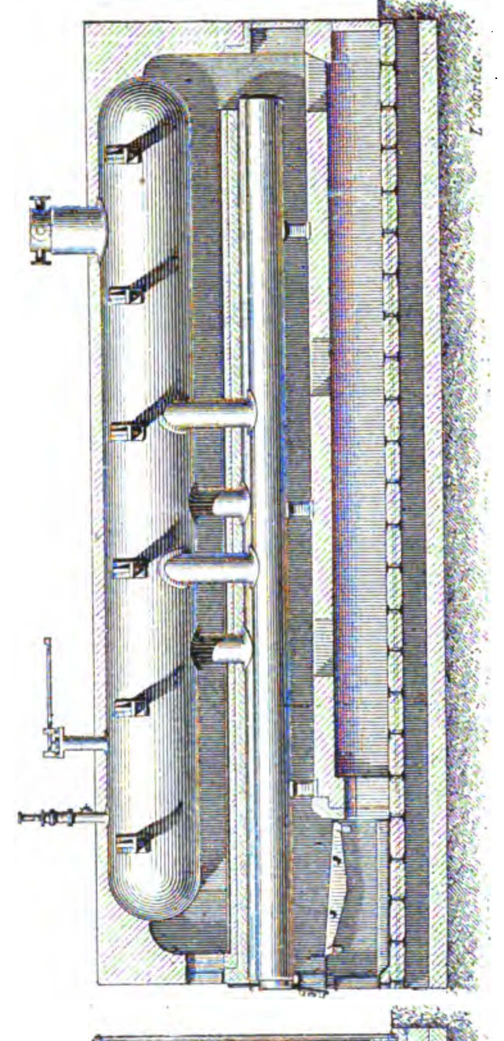
Fig. 592 et 593. — Chaudière à deux bouilleurs (coupes longitudinale et transversale).

à leurs extrémités de larges *collerettes* formées de tôle de choix, embouties et rivées sur les deux enveloppes cylindriques. Ce mode d'assemblage est préférable à l'emploi de cornières à double courbure.

La circulation réciproque d'eau et de vapeur doit être facile entre le bouilleur et le corps principal. La vapeur s'élève par celui des cuissards qui est le plus voisin du foyer. L'eau redescend par l'autre.

Il est bon que leur distance ne soit pas trop grande en vue des dilatations ; et pour ce motif on va jusqu'à mettre les deux cuissards sur la même virole. Cependant il est dangereux de concentrer dans un espace trop restreint les deux causes d'affaiblissement que créent dans les enveloppes métalliques ces vastes ouvertures.

Les supports, ou *chandeliers*, doivent offrir de larges surfaces de contact, épousant complète-



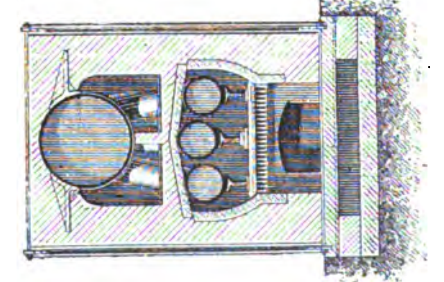


Fig. 594 et 595 — Chaudière à trois bouilleurs (coupes transversale et longitudinale).

ment la courbure de la tôle, afin de diminuer la fatigue par unité superficielle. Pour ce même motif, s'il est nécessaire d'employer des cales, on les établit sous le chandelier, et non entre lui et le bouilleur.

Il est important que la disposition du bouilleur sur les chandeliers permette autant que possible la libre dilatation.

1005 — Le type le plus simple admet un bouilleur unique installé sous la chaudière (fig. 590, 591). On peut aussi en employer deux, placés également en contre-bas (fig. 592, 593) ; ou même trois, disposés suivant une ligne un peu arquée (fig. 594, 595).

Le nombre de ces organes a été dans certains cas beaucoup augmenté, et poussé jusqu'à neuf. On trouverait là, par la pensée, une sorte de transition avec la classe des chaudières tubulées (n° 1029).

1006 — *Calcul des dimensions.* — Il est facile de comparer le diamètre d'une chaudière accompagnée de *n* bouilleurs avec celui du corps cylindrique *unique* qui présenterait à lui seul la même surface de chauffe que cet ensemble.

Supposons, pour fixer les idées, que la ligne des carneaux se trouve exactement au niveau de l'axe. Nous ferons abstraction de l'influence des fonds, en représentant par D le diamètre de ce corps de chaudière et par l la longueur commune de tous les récipients. Dans ces conditions, la surface de chauffe sera représentée par $\frac{\pi D l}{2}$.

Appelons d'autre part d le diamètre du second corps cylindrique, et αd celui de chacun de ses bouilleurs. La nouvelle surface de chauffe comprendra d'abord $\frac{\pi d l}{2}$ pour le corps principal, et en outre $n\pi\alpha d l$, attendu que, à l'inverse de ce qui a lieu pour ce dernier, les bouilleurs sont totalement immergés dans la flamme.

Nous poserons donc, en supprimant le facteur $\frac{\pi l}{2}$, l'égalité :

$$(1) \qquad D = d(1 + 2n\alpha).$$

Si par exemple on adopte, suivant l'usage le plus ordinaire, le rapport de rayons $\alpha = \frac{1}{2}$, il vient simplement :

$$D = (n + 1)d.$$

Le diamètre du corps cylindrique se trouve alors réduit à moitié, au tiers, ou au quart, suivant que l'on emploie un, deux ou trois bouilleurs. De là une importante simplification au point de vue de la construction.

1007 — On peut, d'après cela, se rendre compte de la différence d'encombrement, c'est-à-dire de projection horizontale, ou enfin de largeur totale, puisque la longueur est supposée constante.

Si l'on apprécie cette largeur d'après celle du corps cylindrique, le rapport sera, en vertu de l'équation (1) :

$$\frac{d}{D} = \frac{1}{1 + 2n\alpha}.$$

Si on l'évalue au moyen de la somme des largeurs des bouilleurs juxtaposés [1], on devra substituer à cette formule la suivante :

$$\frac{n\alpha d}{D} = \frac{n\alpha}{1 + 2n\alpha}.$$

On aura donc à employer la première ou la seconde de ces deux expressions suivant que :

$$n\alpha \lesseqgtr 1.$$

[1] En compensant approximativement les $n - 1$ intervalles, que nous négligeons pour plus de simplicité, par l'influence de la disposition en arc de cercle.

Dans l'hypothèse $\alpha = \frac{1}{2}$, on voit qu'il y a lieu d'adopter la première formule pour $n = 1$, la seconde pour $n = 3$, et que toutes es deux concordent pour $n = 2$:

$$n = 1, \qquad \frac{d}{D} = \frac{1}{2} = 0{,}500\,;$$

$$n = 2, \qquad \frac{d}{D} = \frac{n\alpha d}{D} = \frac{1}{3} = 0{,}333\,;$$

$$n = 3, \qquad \frac{n\alpha d}{D} = \frac{3}{8} = 0{,}375.$$

Ces résultats indiquent une économie d'emplacement qui varie de la moitié aux deux tiers dans les cas de la pratique ; avantage important au profit du système des bouilleurs.

1008 — On peut établir une comparaison analogue entre les poids de métal qui entreront dans les deux appareils.

Nous avons vu (n° 989) que l'épaisseur de la tôle doit être proportionnelle au diamètre. La circonférence de la section droite le sera de son côté. Par conséquent les sections droites des enveloppes seront entre elles comme les carrés des diamètres ; et il en sera de même des poids, puisque les longueurs de ces cylindres et leurs poids spécifiques sont les mêmes.

Le rapport des poids absolus des deux systèmes sera donc représenté par la fraction :

$$\frac{d^2(1 + n\alpha^2)}{D^2},$$

ou d'après l'équation (1) :

$$\frac{1 + n\alpha^2}{(1 + 2n\alpha)^2}.$$

Reprenons par exemple l'hypothèse : $\alpha = \frac{1}{2}$, il vient alors :

$$\frac{n + 4}{4(n + 1)^2}.$$

On obtient par conséquent avec :

$$1, \qquad 2, \qquad 3,$$

bouilleurs, les rapports :

$$\frac{5}{16}, \qquad \frac{1}{6}, \qquad \frac{7}{64};$$

c'est-à-dire :

$$0{,}3125; \qquad 0{,}1667; \qquad 0{,}1093.$$

On voit par là que la diminution du poids est très rapide pour les nombres de bouilleurs usités dans la pratique. Si l'on fait encore le calcul pour l'hypothèse $n = 4$, on trouve le rapport $\frac{2}{25}$ ou 0,0800. La nouvelle réduction qui serait ainsi réalisée ne mérite évidemment plus, par son importance, la complication qui résulterait de l'introduction d'un bouilleur de plus.

1009 — Nous pouvons enfin déterminer les dimensions absolues qu'il y a lieu de donner au système, pour le mettre en état de fournir une puissance déterminée.

Nous venons de voir que sa surface de chauffe s a pour valeur :

$$s = \frac{\pi dl}{2}(1 + 2n\alpha).$$

Appelons d'autre part p le poids de vapeur que l'on doit produire par heure, et v le coefficient spécifique d'activité de la chaudière. c'est-à-dire le nombre de kilogrammes que le type auquel elle appartient est capable de vaporiser par heure et par mètre carré. On aura, dans ces conditions :

$$s = \frac{p}{v},$$

ce qui donne :

$$dl = \frac{2p}{(1 + 2n\alpha)\pi v}.$$

Telle est la relation à laquelle devront satisfaire les deux arbitraires l et d.

Le nombre le plus ordinaire de bouilleurs est $n = 2$, et le rapport de rayons le plus fréquent : $\alpha \doteq 1/2$. Si nous remplaçons d'après cela $n\alpha$ par l'unité, il viendra simplement :

$$dl = \frac{2}{3\pi} \cdot \frac{p}{v} = 0{,}212\,\frac{p}{v}.$$

Supposons, pour fixer les idées, les valeurs [1] :

$$p = 1\,000, \qquad v = 15;$$

d'où il suit :

$$dl = 14{,}133.$$

On pourra prendre, par exemple, avec une longueur de 10 mètres, si l'on ne veut pas dépasser cette limite : $d = 1$ m. 41 ; ou bien, si l'on tient à ne pas excéder 1 mètre de diamètre, adopter comme longueur : $l = 14$ m. 13; ou plutôt, comme on trouvera vraisemblablement cette dernière exagérée, la répartir sous la forme d'une batterie de deux chaudières de 7 mètres de longueur. Si l'on tient au contraire à conserver l'unité de l'appareil, il faudra se résigner à franchir les limites en question. On pourra, par exemple, se proposer de le faire dans le même rapport pour toutes les deux, de telle sorte que l'on ait :

$$\frac{d}{1^{m}} = \frac{l}{10^{m}}, \qquad l = 10\,d, \qquad d^{2} = 1{,}4133;$$

$$d = 1^{m},18; \qquad l = 11^{m},80.$$

(1) Ce qui suppose, sur le pied de 8 kilogrammes de vapeur par cheval-heure (t. I, p. 822), une puissance de 125 chevaux.

§ 4

CHAUDIÈRES A FOYER INTÉRIEUR

1010 — *Chaudière de Cornouailles.* — Dans les générateurs à foyer extérieur, la veine gazeuse communique sa chaleur à sa paroi externe en même temps qu'à la paroi interne, qui seule constitue cependant la surface de chauffe utile. La première n'a d'autre rôle que de transmettre au dehors, et en pure perte, le calorique qu'elle reçoit.

On a imaginé de remédier à ce défaut en engouffrant immédiatement les flammes au milieu de la masse liquide, à l'intérieur d'un gros tube ouvert aux deux bouts (fig. 596, 597, 598), et construit, sauf cette différence, de la même manière que les corps cylindriques. Les conditions de son fonctionnement sont toutefois diamétralement inverses : il supporte la pression sur son extrados, et reçoit par l'intérieur l'action calorifique ([1]).

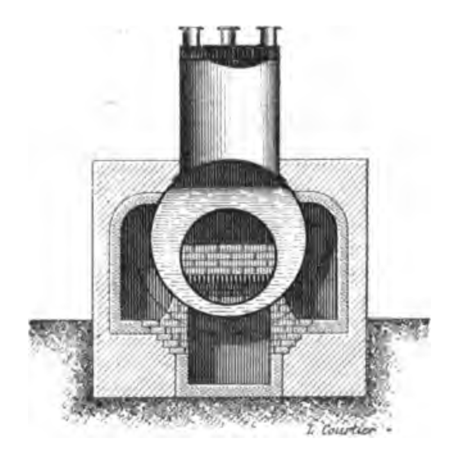


Fig. 596. — Chaudière de Cornouailles. (Coupe transversale).

Après l'avoir parcouru d'un bout à l'autre, le torrent gazeux s'engage en retour de flamme autour du corps cylindrique proprement dit, pour l'échauffer par l'extérieur. La surface utile comprend donc, dans les *chaudières de Cornouailles*, la totalité du

([1]) Chaudières à foyer intérieur : BELLAMY. *Engineering*, 17 juin 1881, p. 610. — ENGERTH. *Revue industrielle*, 30 juillet 1884, p. 303. — PAUKSCH. *Engineering*, 17 juin 1881, p. 610. — PIEDBŒUF. *Ibidem*, 8 avril 1881, p. 350. — SCHULTZ et KNANDT. *Ibidem* 12 juin 1891, p. 699. — WHEELER. *American machinist*, 17 juillet 1886, p. 1.

Chaudières à foyer intérieur de l'ARIZONA. *Engineering*, 3 septembre 1880, p. 192. — Du CITY OF SIDNEY. *American machinist*, 9 octobre 1890, p. 11. — Du ROSLIN CASTLE. *Scientific American supplement*, 5 janvier 1889, p. 10839. — Du VICTORIA. *Engineering*, 5 mars 1881, p. 273.

tube intérieur plus la portion de l'enveloppe extérieure qui est située au-dessous de la ligne des carneaux.

Les positions respectives de ces deux organes ne sont pas indépendantes ; le niveau devant s'élever de la quantité réglementaire

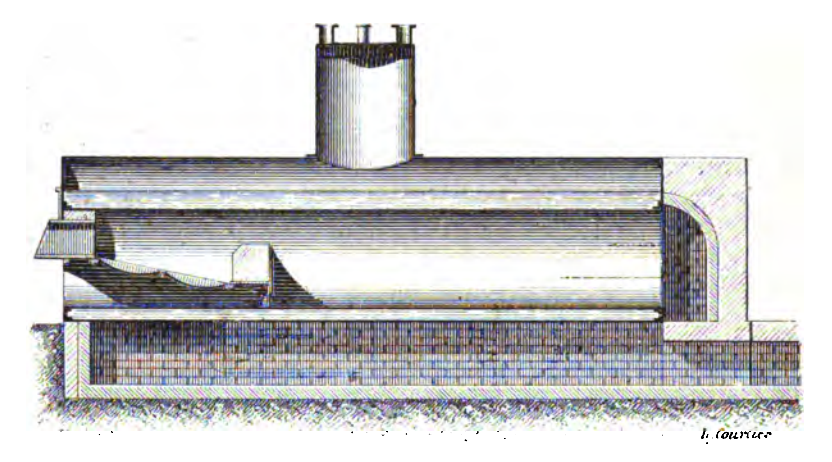


Fig. 597. — Chaudière de Cornouailles (coupe longitudinale).

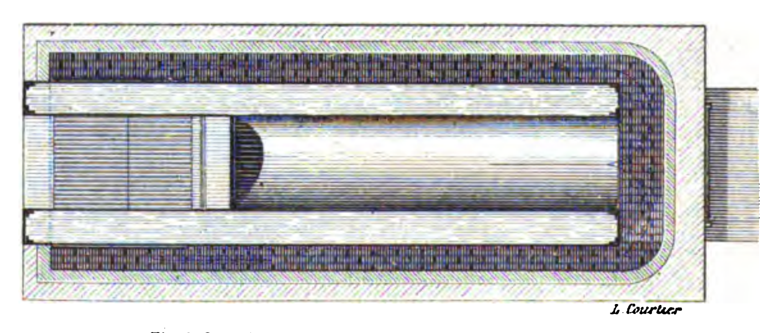


Fig. 598. — Chaudière de Cornouailles (coupe horizontale).

(n° 1001), tout à la fois au-dessus de la ligne des carneaux et du sommet du foyer intérieur.

Ce dernier sert à entretoiser les fonds de l'enveloppe extérieure ; circonstance qui a sa valeur, car ces derniers présentent, à égalité de volume d'eau, un plus grand diamètre que les chaudières ordinaires. Toutefois un assemblage rigoureusement rigide offri-

rait des inconvénients, puisque ce tuyau, sollicité par une température plus élevée que celle qui agit sur le corps cylindrique, se dilate plus que ce dernier. En lui donnant une forme emboutie vers les extrémités, on communique à l'assemblage une certaine élasticité.

Dans les chaudières de Cornouailles, les maçonneries diminuent beaucoup d'importance et disparaissent même quelquefois, ce qui détermine alors un grand refroidissement. On trouve, à la vérité, une faible compensation dans la suppression de la perte du calorique emmagasiné dans les massifs à chaque reprise du travail, pour se dissiper après la mise hors feu.

1011 — L'utilisation de la chaleur est très rationnelle avec ce dispositif, puisque rien ne peut se perdre de l'action immédiate des flammes. Elle est très rapide, car on va jusqu'à reprocher au système d'éteindre trop vite l'incandescence des gaz. La chute des cendres chaudes et des escarbilles n'occasionne même plus de perte calorifique, si l'on a soin de prolonger sous le cendrier les parois mouillées.

On a souvent constaté, pour ces générateurs, des rendements supérieurs de 5 à 10 °/₀ à ceux du type ordinaire.

1012 — En revanche, on doit signaler à leur passif plusieurs inconvénients.

La combustion est gênée par les dimensions restreintes de la grille, et le peu de hauteur qui ne peut dépasser, dans le tube-foyer, la moitié de la largeur de cette dernière. Les manœuvres en sont rendues difficiles. Il faut conserver tout au moins 0 m. 60 de diamètre, et l'on dépasse même 1 mètre. L'application du système deviendrait tout à fait impossible avec des combustibles de qualité inférieure et d'une nature encombrante.

Une attaque aussi directe des flammes est brutale et destructive, surtout quand la houille est pyriteuse. On ne pourrait y remédier à l'aide de revêtements réfractaires sans rétrécir encore les passages.

Le danger résultant de l'abaissement du plan d'eau par défaut d'alimentation (n° 1178) devient ici plus redoutable. En effet, indé-

pendamment de son influence ordinaire le long des parois, très inclinées dans cette région de l'enveloppe extérieure, une légère dénivellation découvre tout d'un coup une grande étendue de tôle presque horizontale aux environs du sommet du foyer intérieur.

Enfin la solidité de ce dernier se trouve placée dans de mauvaises conditions. Étant pressé par l'extérieur, il ne présente plus qu'une forme d'équilibre instable. Lorsqu'une tendance à l'ovalisation s'est prononcée, elle ne s'arrêtera plus ; et le tube qui a commencé à s'affaisser doit être considéré comme condamné. Pour ce motif, on lui donne une épaisseur supérieure de moitié à celle qu'indique le calcul (n° 989) pour les corps cylindriques sollicités par l'intérieur [1]. D'un autre côté, l'exagération du diamètre de l'enveloppe extérieure exige elle-même des tôles épaisses, et finirait même par limiter la pression, sous peine de tomber dans l'exagération. L'ensemble en est rendu plus lourd. Les réparations deviennent aussi moins faciles.

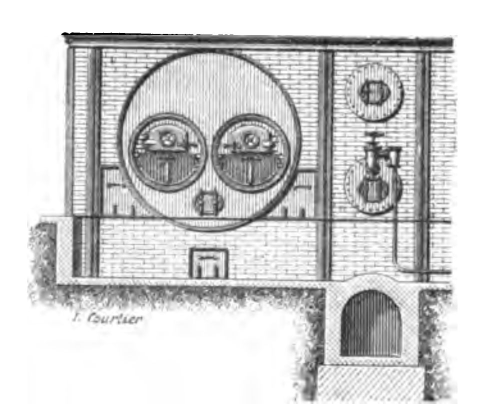


Fig. 599. — Chaudière de Lancastre (élévation).

1013 — *Chaudière de Lancastre*. — La chaudière de Cornouailles ne présente qu'un seul foyer intérieur. On appelle *chaudières du Lancashire* ou *de Lancastre* [2] celles qui en ont deux (fig. 599, 600, 601) groupés

[1] De nombreuses études théoriques ou empiriques ont été publiées sur cette question : Expériences de Fairbairn sur l'écrasement des foyers intérieurs (Morin. *Résistance des matériaux*, t. I, p. 195. — Armengaud. *Publication industrielle*, t. XXV, p. 299. — *Bulletin de la Société d'encouragement*, 1859, p. 150). — Love. Mémoire sur la résistance des conduits intérieurs de fumée. *Mémoires de la Société des Ingénieurs civils*, 1859, p. 471. — Dwelshauvers Dery. *Résistance des matériaux*, 1884, in-8°, p. 113. — Audenet. *Étude sur la chaudière marine*. — Hirsch et Debize. *Leçons sur les machines à vapeur*, t. I, p. 844 à 850. — *Revue industrielle*, 1879, p. 47. — Seaton. *A Manual of Marine Engineering*, 1883, p. 354.

[2] Fairbairn. Chaudières de Lancastre. *Bulletin de la Société d'encouragement*, 2e série, t. II, p. 9. — Mac Dougall. Note sur les chaudières de Lancastre (*Iron*, 18 juin

dans un plan horizontal ; ou même trois, disposés suivant un arc de cercle concentrique au corps principal (fig. 602).

Ce dernier dispositif crée une difficulté spéciale pour les chauffeurs, en raison de l'inégalité des niveaux. Il conduit tout à la fois

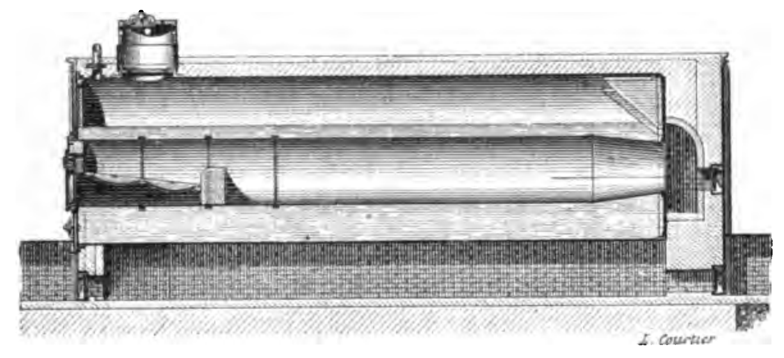


Fig. 600. — Chaudière de Lancastre (coupe longitudinale).

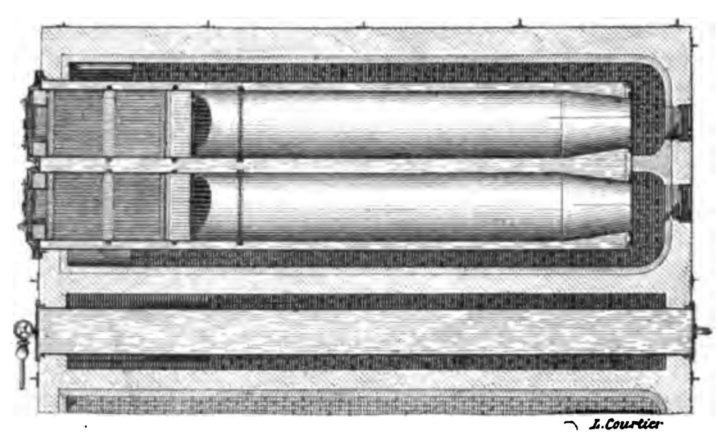


Fig. 601. — Chaudière de Lancastre (coupe horizontale).

à des corps cylindriques très gros et à des tubes-foyers étriqués. Il en résulte la nécessité de tôles fort épaisses pour le premier, et une combustion assez gênée.

1880, p. 446. — *Revue industrielle*, 9 juin 1880, p. 221). — Chaudière Duchesne à trois carneaux intérieurs. *Compte rendu mensuel des séances de la Société de l'industrie minérale de Saint-Étienne*, mai 1877, p. 4.

La réduction du nombre de foyers à deux seulement atténue ces inconvénients et procure une grande régularité de marche, en permettant de croiser les phases de la combustion, si l'on a soin d'alterner convenablement les chargements sur l'une et l'autre grille.

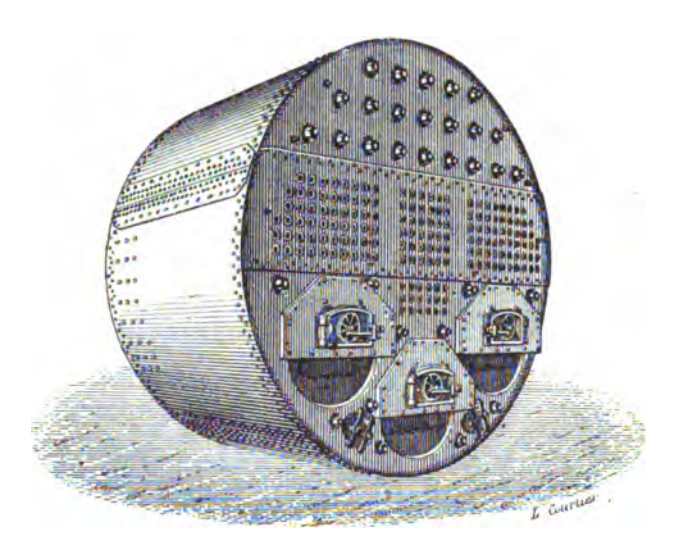


Fig. 602. — Chaudière de Lancastre semi-tubulaire à trois foyers intérieurs.

1014 — *Chaudière Fox.* — Pour remédier au défaut de résistance des tubes intérieurs, on a introduit l'emploi des tôles ondulées ([1]). Le méridien de la surface de révolution est alors, non plus une droite parallèle à l'axe, mais une sinusoïde (fig. 603). Le moment d'inertie de la coupe longitudinale d'une pareille tôle par rapport à son axe neutre (dont la valeur forme la caractéristique de la raideur), se trouve par là notablement augmenté.

([1]) Tôle ondulée de Fox. Couche. *Voie, matériel roulant, exploitation technique des chemins de fer*, t. III, p. 63. — Kuhne. Application des tôles ondulées aux générateurs. *Annales industrielles*, 1884, t. II, p. 446. — Chaudière Fox. *Chronique industrielle*, 5 janvier 1890, p. 1. — Hirsch et Debize. *Leçons sur les machines à vapeur*, t. I, p. 879. — *Compte rendu mensuel des séances de la Société de l'industrie minérale de Saint-Étienne*, 1878, p. 65. — *Portefeuille économique des machines*, mai 1890, p. 69. — Unwin. *On the resistance of Boiler Flues to Collapse.* — Malam. *American machinist*, 4 décembre 1890, p. 7. — *Proceedings of the Institution of civil Engineers*, vol. 46, 1876. — *The Engineer*, 29 mars 1878, p. 213. — *Engineering*, 29 septembre 1882, p. 300.

M. Fox a donné à cette fabrication une grande extension dans ses ateliers de Leeds. Il est nécessaire d'y consacrer des aciers très doux. Le supplément de solidité ainsi réalisé permet d'ailleurs, dans une certaine mesure, d'employer des tôles plus minces et plus légères, qui sont laminées sans soudures.

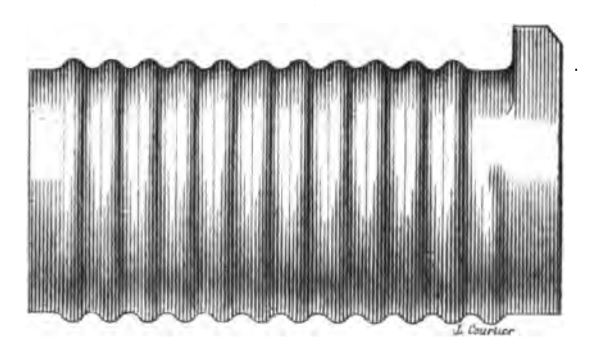


Fig. 603. — Tôle ondulée de Fox (élévation).

Les ondulations communiquent en même temps une certaine élasticité au point de vue des dilatations, et contribuent à diminuer les tractions longitudinales.

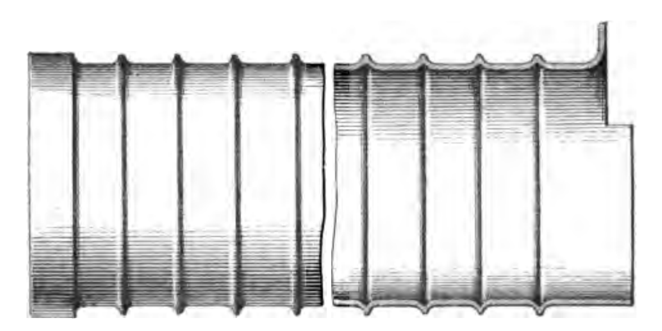


Fig. 604 et 605. — Tôle ondulée de Purves (élévation et coupe verticale).

La surface de chauffe s'en trouve augmentée, à égalité de dimensions dans l'ensemble.

Par contre, on reproche à ce dispositif de former des nids de suie dans ses ondulations successives, et de diminuer ainsi l'influence de la convection des gaz.

Dans le foyer Purves (¹), on a cherché à concilier ces divers points de vue, en employant, pour le profil méridien, une succession de segments rectilignes nettement séparés par des nervures en forme de V (fig. 604, 605).

1015 — *Chaudière Galloway.* — M. Galloway a cherché une garantie contre l'écrasement dans un remède encore plus



Fig. 606.
Entretoise Galloway.
(Vue perspective).

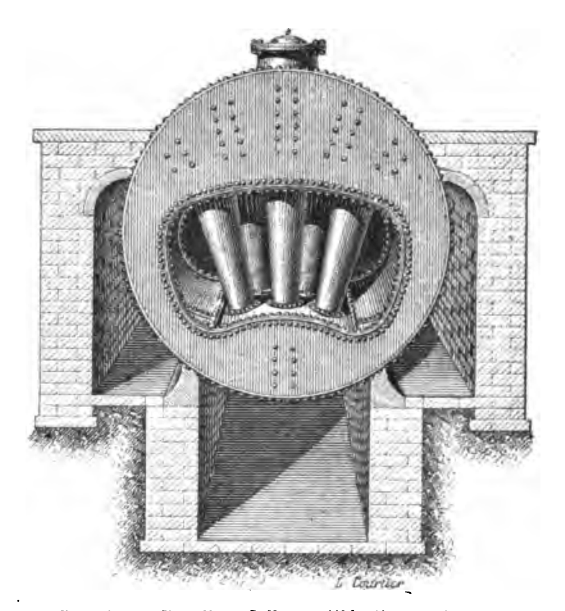


Fig. 607. — Chaudière Galloway (élévation antérieure).

direct. Sa fabrication a pris un développement colossal (²).

Il établit de distance en distance, suivant certains diamètres du tube-foyer, des arcs-boutants (fig. 606) qui en étrésillonnent les parois (fig. 607). On a soin de disposer ces entretoises en quinconce, afin de mieux brasser les gaz en les forçant à infléchir leurs trajectoires pour se glisser à travers ces obstacles successifs.

Ces armatures sont formées de tubes creux, à section elliptique, et de forme légèrement tronc-conique. Leurs extrémités sont

(¹) Foyer Purves. *Annales industrielles*, 15 février 1891, p. 203. — Foyer Morison. *La Métallurgie*, 19 octobre 1891, p. 1288. — Foyer Farnley. Sauvage. *Annales des mines*, novembre-décembre 1890, p. 570.

(²) Hirsch. *Rapport sur l'Exposition de* 1878, p. 98. — Hirsch et Debize. *Leçons sur les machines à vapeur*, t. I, p. 628. — *Engineering*, 1876, p. 456.

munies de *collerettes* embouties, analogues à celles des cuissards (fig. 606). La plus petite des deux collerettes peut passer par le plus grand orifice, pour venir s'assembler sur la tôle à l'aide de clouûres. L'eau circule à travers ces entretoises avec une grande activité en raison des différences de densité (fig. 608). Il en résulte une augmentation très efficace de la surface de chauffe.

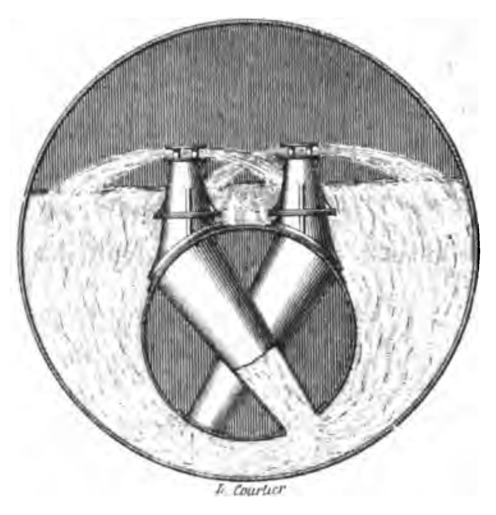


Fig. 608. — Chaudière de Gamgee (coupe verticale).

Ce mode de soutènement permet de s'écarter, pour le tube-foyer, de la section circulaire. On lui donne une forme elliptique, ou mieux encore un ciel en arc de cercle très aplati (fig. 607); ce qui a pour avantage de moins relever le plan d'eau.

La paroi longitudinale présente des renflements formant chicane, de manière à ramener incessamment les gaz vers l'axe.

M. Galloway adopte souvent le type Lancastre. Derrière l'autel, s'ouvrent les deux foyers, dans la paroi d'une chambre de combustion assez vaste pour que les gaz soient convenablement brassés avant de s'engager dans les tubes.

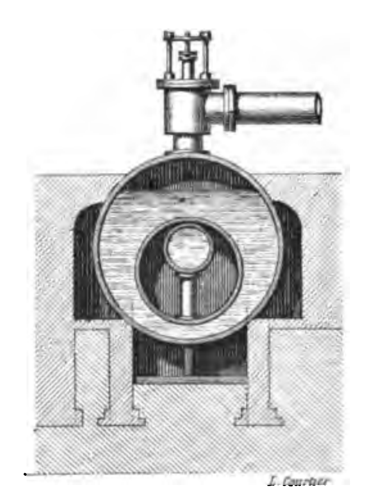


Fig. 609. — Chaudière de Cornouailles à bouilleur intérieur (coupe verticale).

1016 — *Variantes diverses.* — Quelques chaudières de Cornouailles renferment un bouilleur à l'intérieur du tube-foyer

(fig. 609). Mais la suie a tendance à s'y déposer, en raison du rapide refroidissement des gaz. Il résulte nécessairement de cette addition, faite dans de semblables conditions, un bouilleur trop petit, en même temps qu'un carneau trop grand, et cependant étriqué par la présence du premier. Le nettoyage est en outre rendu très difficile (fig. 704).

1017 — On a donné à certaines chaudières à foyer intérieur la disposition verticale (n° 1057). Le carneau est alors, par exception, foncé à sa partie supérieure, maintenue au-dessous de la surface liquide. Le gaz s'en échappe par une série de petits tubes, à travers cette lame d'eau et la vapeur qui la surmonte.

Une telle disposition est anti-réglementaire au point de vue strict (n° 1187), et peu favorable d'ailleurs, car elle participe aux inconvénients généraux du type vertical (n° 1057).

1018 — *Calcul des dimensions.* — Nous pouvons, comme ci-dessus, déterminer les dimensions de l'appareil qui sera capable d'une puissance assignée à l'avance. Nous conserverons à cet effet les notations du n° 1009.

Envisageons, pour fixer les idées, une chaudière de Lancastre. Sa surface de chauffe se composera de la totalité de la superficie de ses deux foyers intérieurs : $2\pi\alpha ld$, et d'une fraction de la périphérie du corps cylindrique, que l'on peut prendre égale à $\frac{2}{3}$, attendu que la ligne des carneaux se relève ici notablement par la condition de se trouver au-dessus du sommet des tubes-foyers :

$$s = \frac{2}{3}\pi ld + 2\pi\alpha ld = \frac{2\pi ld}{3}(1 + 3\alpha).$$

Il suit de là :

$$ld = \frac{3p}{2\pi v(1 + 3\alpha)}.$$

Le rapport le plus ordinaire de rayons est $\alpha = \frac{2}{5}$. En adoptant cette

valeur, il vient :

$$ld = \frac{15}{22\pi} \cdot \frac{p}{v} = 0{,}217\,\frac{p}{v}.$$

Reprenons par exemple les données ci-dessus (n° 1009) :

$$p = 1\,000, \qquad v = 15, \qquad ld = 14{,}47.$$

Si l'on impose *a priori*, pour le foyer intérieur, le diamètre minimum compatible avec des visites intérieures : $0^m{,}60$ (n° 1151), nous aurons :

$$d = \frac{5}{2} \cdot 0^m{,}60 = 1^m{,}50; \qquad l = \frac{14{,}47}{1{,}50} = 9^m{,}60.$$

Si l'on adopte au contraire son maximum ordinaire : 1 mètre, il viendra :

$$d = \frac{5}{2} \cdot 1^m{,}00 = 2^m{,}50; \qquad l = \frac{14{,}47}{2{,}50} = 5^m{,}80.$$

On voit que l'une et l'autre de ces limites sont pratiquement acceptables. Il en sera par conséquent de même pour toutes les combinaisons intermédiaires que l'on préférerait adopter.

5

CHAUDIÈRES TUBULAIRES

1019 — *Type locomotive*. — En prolongeant indéfiniment par la pensée la progression du nombre des foyers intérieurs, que l'on a poussée jusqu'à trois dans les foyers de Lancastre [1], on arrive à

[1] En renonçant à la possibilité de la visite intérieure de ces organes par le passage d'un ouvrier; visite qui n'a plus la même importance, lorsqu'aux viroles de tôle d'un diamètre notable on substitue des tubes d'un faible calibre, et d'un tout autre mode de fabrication.

la *chaudière tubulaire* (¹). Le principe de l'utilisation de la chaleur par la pénétration des flammes au sein de la masse liquide y acquiert toute sa valeur, au moyen de cette extrême subdivision de la masse gazeuse; d'où résulte une augmentation décisive de la surface de chauffe sous un volume d'ensemble restreint.

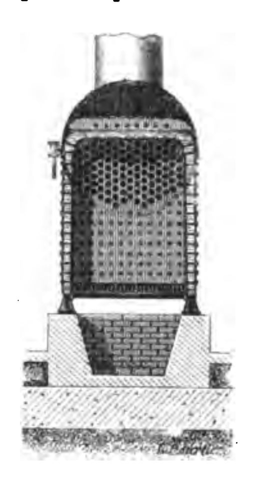


Fig. 610.
Chaudière tubulaire.
(Coupe transversale).

Cette condition s'imposait absolument pour les locomotives, afin de pouvoir installer sur un véhicule une puissance importante. On peut dire que toute l'industrie des chemins de fer est devenue le corollaire de cette admirable invention de Seguin qui date de 1827 (²), depuis que l'application en a été faite à *la Fusée* par Stephenson en 1829.

C'est surtout à l'occasion de ces machines, et de celles de la marine, que le type tubulaire a reçu ses principaux perfectionnements. Aussi l'une des formes les plus usuelles sous lesquelles on le rencontre parmi les

(¹) Chaudières tubulaires : Allen. *Engineering*, 1872, p. 277. — Bate. *American machinist*, 12 février 1881, p. 5. — Bellamy. *Engineering*, 15 juillet 1881, p. 64. — Bromisch. *Scientific american*, 1er novembre 1890, p. 275. — Brown. *Engineering*, 9 septembre 1881, p. 156. — Cadiat. *Revue industrielle*, 17 septembre 1885, p. 373. — Davey Paxman. *Revue technique de l'Exposition universelle de* 1889, 6e partie, t. I, p. 177. — Delany. *American machinist*, 13 août 1887, p. 3. — Fox. *Scientific american*, 19 septembre 1885, p. 178. — Guillemin. Résal. *Traité de mécanique générale*, t. IV, p. 150. — Hennessey. *American machinist*, 5 novembre 1881, p. 5. — Isherwood. *Journal of Franklin Institute*, avril 1879, p. 248. — Le Moal. Rapport Farcot. *Bulletin de la Société d'encouragement*, janvier 1891, p. 22. — Le Van. *Journal of Franklin Institute*, mai 1885, p. 306. — Liénard Benoit. *The Engineer*, 17 mai 1878, p. 354. — Maniguet. *Annales industrielles*, 29 mars 1891, p. 402. — Menay. Armengaud. *Publication industrielle*, vol. 30, p. 193. — Meunier. Hirsch et Debize. *Leçons sur les machines à vapeur*, t. I, p. 596. — Miller. *American machinist*, 13 août 1881, p. 1. — Molinos et Pronnier. Hirsch et Debize. *Leçons sur les machines à vapeur*, t. I, p. 596. — Morris. *Scientific american supplement*, 18 janvier 1890, p. 11 705. — Pelestot. *Revue industrielle*, 5 mars 1884, p. 90. — Poole et Lunt. *American machinist*, 9 août 1884, p. 7. — Scheffer. *Ibidem*, 29 novembre 1884, p. 6. — Sinclair. *Journal of Franklin Institute*, septembre 1878. — Sulzer. Hirsch. *Rapport sur l'Exposition de* 1878, p. 85. — Toward. *Engineering*, 12 février 1892, p. 209. — Ziese. *Engineering*, 15 décembre 1882, p. 579. — Mines de Calumet et Hécla. *Engineering*, 31 mars 1882, p. 290. — Station de Saint-James. *The Engineer*, 5 septembre 1890, p. 189.

(²) De Pambour. *Traité des machines locomotives*, p. 7.

machines fixes ou voyageuses porte-t-elle précisément le nom de *type-locomotive*. C'est l'exemple que nous décrirons ici pour fixer les idées (fig. 610, 611).

1020 — La grille est placée dans une vaste boîte à feu de forme parallélépipédique. Les parois planes de cette dernière sont mouillées par l'eau, renfermée entre deux feuilles de tôle entretoisées. Le ciel est soutenu par de fortes armatures, qui portent sur les parties latérales. La face arrière de cette chambre constitue

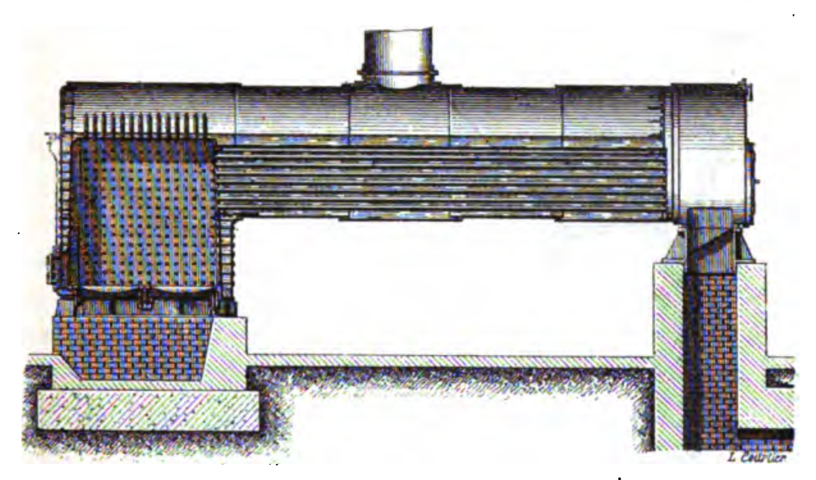


Fig. 611. — Chaudière tubulaire (coupe longitudinale).

l'une des deux *plaques tubulaires* qui ferment les extrémités du corps cylindrique, rempli d'eau dans les intervalles des tubes. Ces plaques sont percées de trous régulièrement disposés, soit en quinconce formé de triangles équilatéraux, soit en files verticales, ce qui paraît plus favorable au dégagement de la vapeur.

Les tubes, percés de part en part, vont d'une plaque à l'autre, établissant la communication entre la boîte à feu et la boîte à fumée. Assujettis aux plaques tubulaires, ils ont pour effet de les étrésillonner mutuellement, mais en même temps de les fatiguer par le jeu des dilatations, attendu qu'ils sont soumis à une température plus élevée que celle qui sollicite l'enveloppe extérieure, rivée de son côté aux bords de ces plaques.

Pour remédier à cet inconvénient, on communique parfois quelque élasticité à la plupart des tubes à l'aide de joints d'amiante, en réservant le rôle d'entretoises à un petit nombre d'entre eux, ou mieux encore à des tirants spéciaux. Dans l'évaluation de ces efforts, on n'oubliera pas que la pression ne s'exerce sur les plaques que dans les intervalles des tubes; on devra donc retrancher de leur surface, comme pour une écumoire, la totalité de la section de ces derniers.

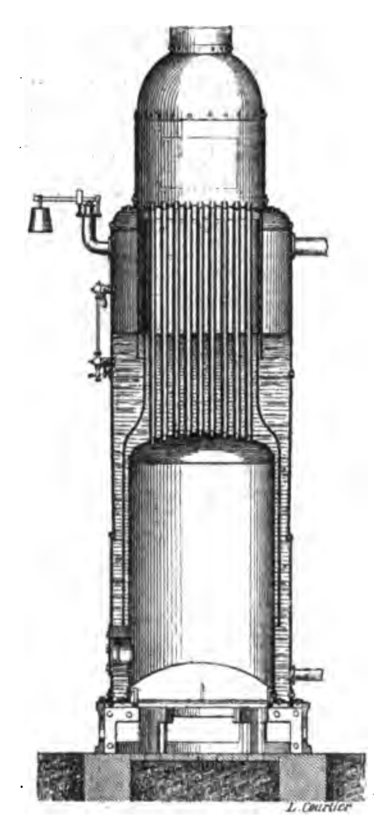


Fig. 612. — Chaudière tubulaire verticale. (Coupe méridienne).

La longueur est en général de 3 à 5 mètres. La surface de chauffe tubulaire est décuple de celle du foyer lui-même.

Dans la boîte à fumée s'ouvre une porte d'accès, destinée à permettre le ramonage intérieur des tubes à l'aide d'écouvillons. Les gaz se rendent de cette enceinte à la cheminée.

1021 — *Types divers.* — Dans quelques machines tubulaires fixes, on ramène les gaz chauds autour de l'enveloppe en retour de flamme.

La plupart des générateurs tubulaires sont horizontaux. On en voit cependant assez souvent de verticaux (fig. 612). Sulzer a construit un type incliné.

1022 — *Chaudières semi-tubulaires.* — On appelle chaudières *semi-tubulaires* [1] des combinaisons, variables comme dispositifs,

[1] Chaudières semi-tubulaires : BARBE. *Revue technique de l'Exposition de* 1889 6e partie, t. I, p. 180. — DAMEY. *Ibidem*, p. 277. — DULAC (*Revue industrielle*, 28 novembre 1883, p. 473 — *Portefeuille économique des machines*, 1884, t. I). — LECHERF.

dans lesquelles on associe avec des formes ordinaires à bouilleurs

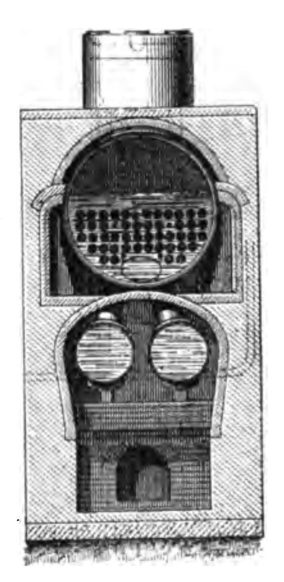


Fig. 613. — Chaudière semi-tubulaire (coupe transversale).

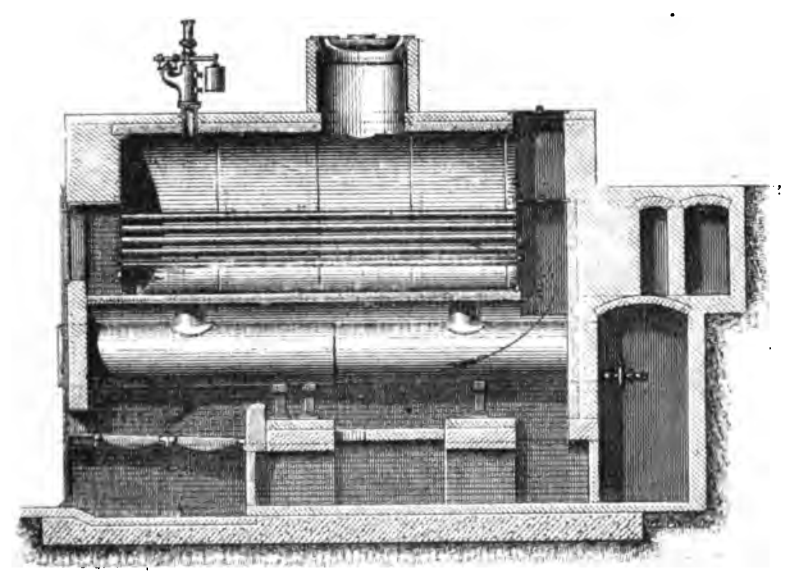


Fig. 614. — Chaudière semi-tubulaire (coupe longitudinale).

Armengaud. *Les progrès de l'industrie*, t. I, pl. I. — Lencauchez. *Journal of Franklin Institute*, juillet 1881, p. 21. — Meunier (*Revue industrielle*, 16 avril 1884, p. 155. —

(fig. 613, 614) un faisceau tubulaire, afin d'augmenter suffisamment la surface de chauffe sous le volume que l'on ne veut pas dépasser pour l'ensemble.

On rencontre également des chaudières de Cornouailles, criblées de tubes de fumée dans la partie occupée par l'eau (fig. 615, 616).

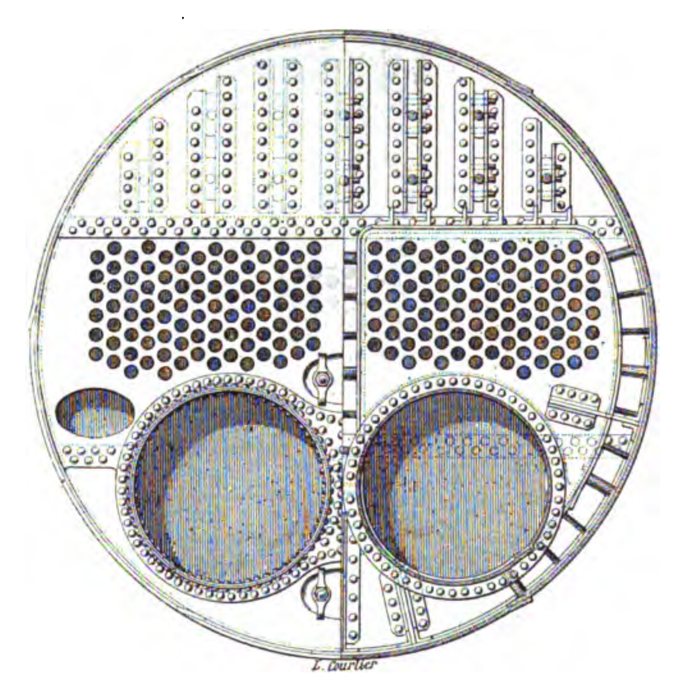


Fig. 615. — Chaudière marine semi-tubulaire (élévation antérieure).

Ceux-ci sont horizontaux ou verticaux, en même temps que le corps et le foyer intérieur. Dans la chaudière Fouché et de la Harpe [1], on a combiné, avec un générateur de Cornouailles horizontal, un faisceau tubulaire vertical.

1023 — *Chaudières à faisceau tubulaire amovible.* — La conduite du feu, avec les appareils tubulaires, doit être particulière-

Revue technique de l'Exposition de 1889, 6e partie, t. I, p. 229). — Victoor et Fourcy. *Annales industrielles*, 20 juin 1870, p. 354.

[1] Hirsch et Debize. *Leçons sur les machines à vapeur*, t. I, p. 627.

ment attentive. Les variations de niveau sont rapides, ce qui expose aux coups de feu. Il en est de même des dépôts, particulièrement difficiles à enlever.

Pour faciliter ce nettoyage, on a imaginé de rendre les tubes *amovibles*. Ce principe peut être appliqué de trois manières diffé-

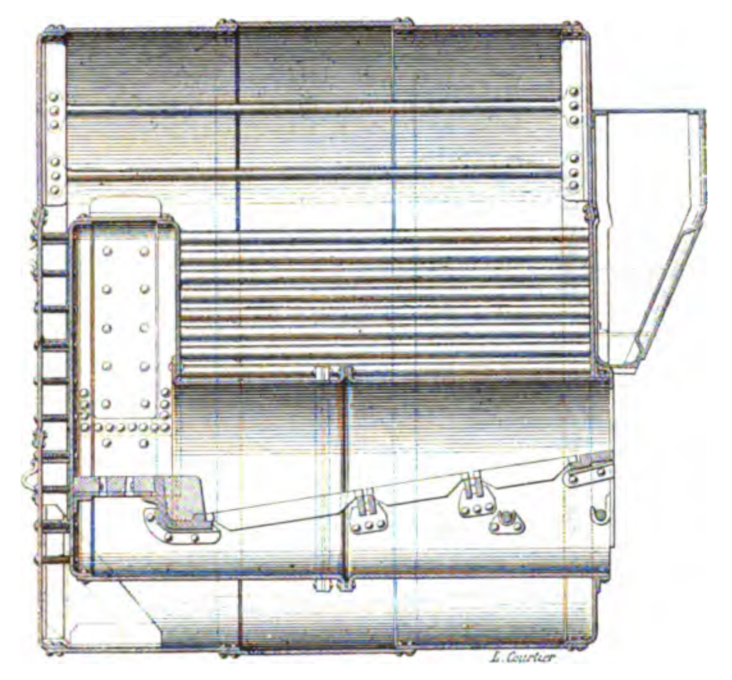


Fig. 616. — Chaudière marine semi-tubulaire (coupe verticale).

rentes : 1° en rendant la totalité des tubes indépendants, de manière à pouvoir les détartrer individuellement (nous reviendrons plus loin [n° 1028] sur les moyens en usage à cet effet) ; 2° en employant un certain nombre seulement de tubes amovibles, dont l'enlèvement laissera dans le faisceau des vides suffisants pour permettre le détartrage sur place ; 3° avec un faisceau tubulaire amovible en totalité [1].

[1] Chaudières à foyer amovible : Farcot (Denfer. *Traité pratique des chaudières à vapeur*, p. 43. — Hirsch. *Rapport sur l'Exposition de* 1878, p. 90. — Ser. *Physique industrielle*, t. II, p. 66). — Thomas et Laurens (Laurent et Dunkel. *Album du construc-*

1024 — Les figures 617, 618 représentent la chaudière à foyer amovible de Thomas et Laurens. Un cylindre central reçoit les gaz, et les conduit jusqu'à son extrémité. De là ils reviennent à la cheminée placée à l'avant, en traversant un faisceau de tubes disposés autour du cylindre. L'enveloppe extérieure est ainsi préservée; circonstance utile, puisque c'est elle qui est affaiblie par toutes les ouvertures nécessaires pour l'installation des appareils de sûreté.

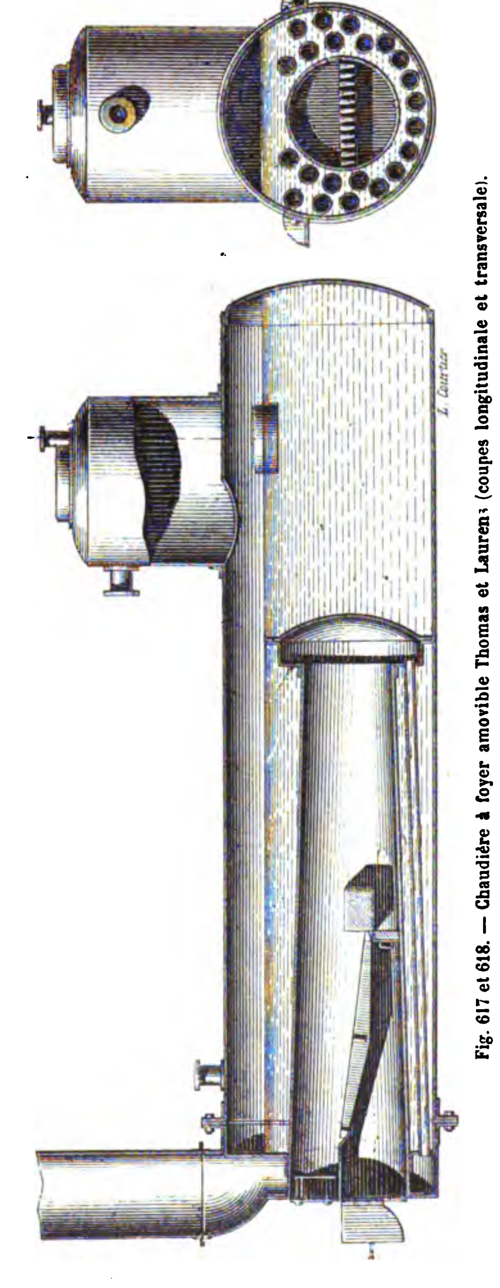


Fig. 617 et 618. — Chaudière à foyer amovible Thomas et Laurens (coupes longitudinale et transversale).

Le système intérieur peut se tirer au dehors. Il est nécessaire à cet effet de laisser libre un emplacement au moins égal à sa longueur. On le remet en place en refaisant un

teur de chaudières à vapeur, pl. 77. — Denfer. *Traité pratique des chaudières à vapeur*, pl. 43. — Armengaud. *Génie industriel*, vol. 21). — Velliet et Lescure. Hirsch. *Rapport sur l'Exposition de* 1878, p. 89. — Weyher et Richemond (fig. 619, 620). *Revue technique de l'Exposition de* 1889, 6e partie, t. I, p. 237. — Laurent et Dunkel. *Album du constructeur de chaudières à vapeur*, p. 78. — Denfer. *Traité pratique des chaudières à vapeur*, p. 43. — Ser *Physique industrielle*, t. II, p. 63.

joint à bride avec des soins particuliers, car ses défauts d'étan-

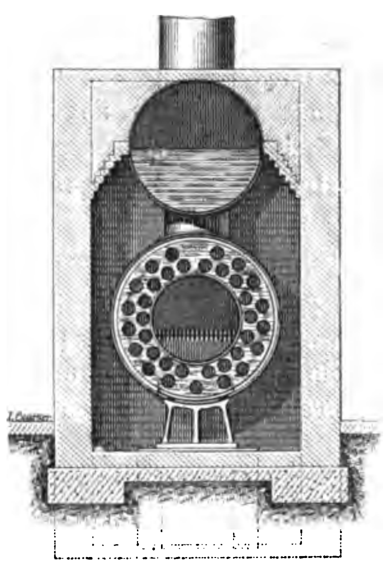


Fig. 619. — Chaudière à foyer amovible Weyher et Richemond (coupe transversale).

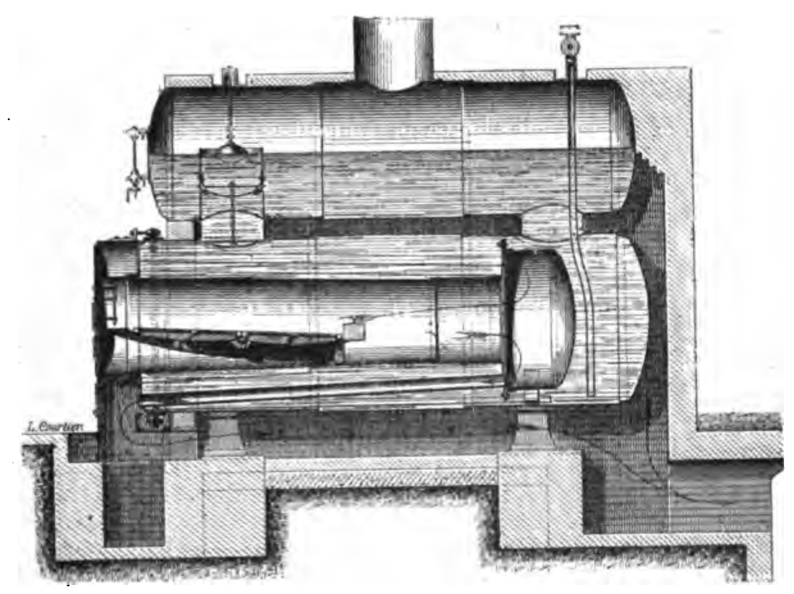


Fig. 620. — Chaudière à foyer amovible Weyher et Richemond (coupe longitudinale).

chéité ne se manifesteraient qu'au moment de la remise en marche.

1025 — *Tubes.* — Les tubes se font en fer, en cuivre, ou en laiton (1).

Ce dernier alliage est employé presque exclusivement par la marine militaire, avec 68 parties de cuivre de première qualité et 32 de zinc. Il résiste mieux que le fer aux acides, et paraît s'entartrer avec moins de facilité. On fabrique ces tubes sans soudure, et l'on recuit les extrémités pour les préparer au travail du *baguage*.

Le cuivre est peu usité. Il est plus cher que le laiton, et plus mou. Ses surfaces s'usent par les petits chocs des corpuscules qu'entraîne le courant gazeux. On utilise parfois sa malléabilité pour le travail des joints, en brasant sur des tubes en laiton des bouts en cuivre rouge, auxquels on peut donner un surcroît d'épaisseur.

Le fer est économique. Il coûte deux fois moins cher que le laiton. Il est moins dilatable que ce dernier, et l'emporte également pour la résistance à la pression, mais non aux acides. Il s'entartre facilement, et se prête moins bien au travail des assemblages. On fabrique ces tubes soit par soudure, soit par étirage sans soudure.

1026 — La quantité de chaleur qui passe à travers la paroi des tubes augmente avec la vitesse du courant gazeux (2), laquelle varie en raison inverse de la section, ou du carré du diamètre.

Ce diamètre est compris entre 4 et 10 centimètres. On se rapproche de la première limite pour les locomotives, et de la seconde dans la marine. Au-dessous de 4 centimètres, le ramonage devient impraticable. Au delà de 10 centimètres, le diamètre est trop grand pour l'opération du baguage. En outre, si de tels tubes venaient à crever, leur rupture occasionnerait des dégâts importants.

(1) Emploi des tubes d'acier dans les chaudières. *Annales industrielles*, 17 février 1889, p. 202. — Coste. Préparation et montage des tubes. *Annales des mines*, 8e série, t. XV, p. 378. — Commission belge. Consolidation des tubes et des foyers. *Ibidem*, 7e série, t. XVIII, p. 558. — Compère. Note sur les conditions de résistance des tubes de chaudières multitubulaires. *Mémoires de la Société des Ingénieurs civils*, novembre 1891, p. 502. — Prégardien de Deutz. Perfectionnements aux chaudières tubulaires. *Bulletin de la Société d'encouragement*, 3e série, t. XII, p. 573.

(2) Expériences de M. Almgren (Reuleaux. *Der Konstrukteur*, 4e édit., p. 1092).

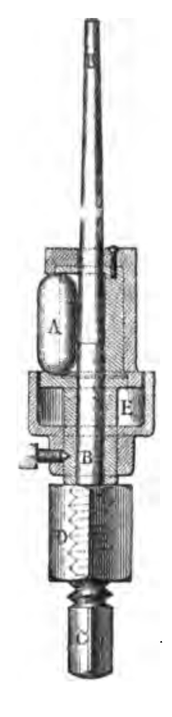
Une épaisseur de 5 millimètres les assure contre la pression. Les tubes ne périssent alors que par suite de défauts spéciaux du métal, et non par défaut de solidité théorique.

L'intervalle mesuré bord à bord ne doit pas descendre au-dessous de 15 à 20 millimètres. A cette limite déjà, l'entartrement risque de devenir inextricable.

Les tubes Serve ([1]) présentent intérieurement des nervures longitudinales, destinées à augmenter leur surface de chauffe.

Les tubes Guebhard ([2]) renferment une spirale en fer feuillard, pour forcer les gaz à circuler en hélice, de manière à faciliter le brassage en même temps que l'échange des températures.

1027 — *Pose des tubes.* — Les tubes s'adaptent aux plaques tubulaires au moyen de viroles en fer ou en acier que l'on force à l'intérieur des bouts, en rabattant les bords de ces derniers dans des fraisures pratiquées tout autour des trous. Ces viroles présentent l'inconvénient de réduire le débouché, et de fatiguer la plaque tubulaire. Aux États-Unis on environne l'extrémité du tube d'une mince bague en cuivre, qui s'écrase contre la plaque tubulaire ([3]).



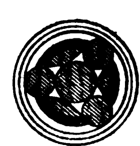


Fig. 621 et 622.
Expanseur Dudgeon.
(Plan et élévation).

L'*expanseur Dudgeon* ([4]) est un outil fort employé pour mandriner les bouts, en profitant de

([1]) Tubes Serve (*Bulletin de la Société d'encouragement*, 4e série, t. IV, p. 448. — *Annales industrielles*, 22 septembre 1889, 4 janvier et 18 octobre 1891. — *Engineering*, 24 octobre 1890).
Tubes Chomienne. *The railroad and Engineering Gazette*, mai 1887, p. 203.
Tubes *à ailerons*. *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, t. C, p. 1530.

([2]) Tubes Guebhard. Bienaymé. *Traité des machines marines*, p. 479.

([3]) Baudry. *Annales des mines*, 8e série, t. XII, p. 81.

([4]) G. Richard. *La chaudière locomotive*, gr. in-4°, p. 607. — *Revue universelle des mines et de la métallurgie*, t. XXIX, p. 272. — Coste. *Annales des mines*, 8e série, t. XV, p. 378. — Hervé. Appareil à mandriner les tubes. *Annales industrielles*, 1883, t. I, p. 113.

la malléabilité du cuivre rouge, de manière à pouvoir se passer de viroles. Trois galets A (fig. 621, 622) roulent sur la paroi interne du tube, en raison de leur adhérence avec la tige B, dont l'ouvrier détermine la rotation à l'aide du carré C et d'un tourne-à-gauche. En même temps il appuie longitudinalement, pour forcer l'écartement en raison de la conicité de la tige. Quand il s'agit de desserrer, on fait tourner l'écrou D, qui prend, au moyen du manchon E, son point d'appui sur les bords du trou.

Lorsque les tubes ont été assujettis à leurs places, on les y maintient à l'aide d'une *contre-plaque*. Les trous de cette dernière sont placés en regard de ceux de la première plaque, mais ils ont un calibre un peu moindre, pour que les tubes ne puissent s'y engager, tout en restant supérieur au vide intérieur de ces derniers, afin de ne pas gêner l'écoulement des gaz.

1028 — *Tubes amovibles.* — Quand des tubes ont été installés par le procédé ordinaire, il devient très difficile de les retirer sans avaries. On se voit souvent obligé, pour les faire servir de nouveau, de tronquer les extrémités et d'en braser de nouvelles. Il est donc nécessaire de disposer d'une manière spéciale [1] les tubes que l'on veut rendre habituellement amovibles [2].

Dans le système Bérendorf, on soude aux deux extrémités du tube deux bagues coniques exactement tournées sur deux diamètres un peu différents de l'une à l'autre. Les plaques tubulaires sont forées inégalement d'après chacun de ces deux calibres. On enfile la plus petite bague à travers le plus grand orifice, et on l'amène

[1] Système de tubes amovibles. *Neuvième Congrès des Ingénieurs en chef des Associations de Propriétaires d'appareils à vapeur*, Paris, 1886, p. 127.

[2] Tubes amovibles : BERENDORF (*Bulletin technologique de la Société des anciens Élèves des Écoles d'arts et métiers*, janvier 1886, p. 13. — Benoit. *Cours de chaudières à vapeur*, p. 84). — CONSTANT. *Bulletin technologique de la Société des anciens Élèves des Écoles d'arts et métiers*, janvier 1886, p. 13. — GANTELME. Ledieu. *Nouvelles machines marines*, t. III, p. 175. — GIRARD. Hirsch et Debize. *Leçons sur les machines à vapeur*, t. I, p. 598. — INFERNAT et GOUTTES. Ledieu. *Nouvelles machines marines*, t. III, p. 177. — LANGLOIS. *Bulletin technologique de la Société des anciens Élèves des Écoles d'arts et métiers*, janvier 1886, p. 13. — MONTUPET (Seraine. *Ibidem*, p. 13. — *Revue industrielle*, 3 décembre 1885, p. 482). — TOSCER. Ledieu. *Nouvelles machines marines*, t. III, p. 175.

à son logement dans la plaque opposée. On l'y assujettit alors, en même temps que la grande bague dans le sien, en frappant sur la tête d'un boulon, dont l'embase s'appuie sur le bout du tube, et dont l'extrémité terminée par un étrier prend un point d'appui sur l'autre plaque.

La conicité détermine une tendance à ressortir. On s'y oppose en installant, contre les grandes bases, une contre-plaque dans la boîte à fumée. Il y a lieu de temps en temps de revoir certains joints des tubes démontables, qui se fatiguent et exposent à des fuites [1].

[1] De Maupeou. *Mémorial du Génie maritime*, 1889, p. 221.

CHAPITRE LVI

CHAUDIÈRES TUBULÉES

—

§ 1

GÉNÉRALITÉS

1029 — Nous avons, dans le chapitre précédent, étudié les diverses catégories de chaudières qui, tout en variant notablement dans la forme, présentent toutefois ce caractère commun de renfermer à l'intérieur d'un corps cylindrique, qui leur constitue une enveloppe générale, un grand volume d'eau, lequel est un régulateur pour la marche, mais en même temps une cause de danger.

A l'autre extrémité de l'échelle se placent des générateurs, pour la construction desquels on a cédé à une préoccupation inverse : la sécurité avant tout ([1]), et par conséquent peu d'eau (n° 999). Pour en faire malgré cela passer, dans un temps donné, une grande quantité à l'état de vapeur, afin de réaliser une puissance notable, il sera nécessaire que ce liquide traverse rapidement l'appareil, en recevant la chaleur avec une activité toute spéciale. Or, nous avons vu que l'eau possède une faible conductibilité, ce qui exige un renouvellement actif des contacts entre elle et les parties les plus efficaces de la surface de chauffe, en un mot une circulation intensive.

([1]) Ces appareils se sont beaucoup répandus dans ces derniers temps, et leur emploi continuera certainement à se développer, parce qu'ils fournissent le moyen pratique de concilier, dans les locaux habités et même populeux (théâtres, grands magasins, etc.), la nécessité d'un moteur puissant pour la production de la lumière électrique, avec les exigences de la réglementation publique au point de vue de la sécurité et du volume d'eau.

Aussi le nom qui nous paraîtrait le mieux convenir pour cette seconde classe d'appareils serait-il celui de *chaudières à circulation*. Mais l'usage l'a restreint, par le fait, à l'une seulement des catégories que nous distinguerons dans cette classe, celle à laquelle nous consacrerons le second paragraphe du présent chapitre. Nous adopterons donc pour tout l'ensemble la dénomination de *chaudières tubulées*, qui est également acceptée dans l'usage.

Cette expression s'inspire de la transition que l'on peut concevoir entre ces nouveaux appareils et les chaudières tubulaires. Il suffit pour cela d'une simple interversion des rôles, qui place l'eau à l'intérieur des tubes et la flamme dans leurs intervalles. En un mot, les chaudières tubulaires nous présentent des *tubes de fumée*, et les chaudières tubulées des *tubes d'eau*.

La classe des chaudières tubulées se divisera pour nous en trois catégories, que nous rangerons méthodiquement suivant l'ordre de décroissance du volume d'eau, à égalité de puissance.

1030 — Dans la première, nous comprendrons des générateurs que l'on désigne quelquefois sous le nom de genre Field, du nom de l'un de ses types les plus répandus. On trouve dans ces appareils, avec une disposition généralement rayonnante, une nombreuse série de petits appendices qui sont reliés à une masse liquide principale. Ils constituent autant de centres spéciaux de vaporisation. L'eau vient y puiser le calorique, et la partie qui ne s'est pas immédiatement gazéifiée rentre vivement dans la masse générale, pendant qu'une quantité équivalente vient prendre sa place. On réalise ainsi une rapide communication de la chaleur au liquide.

Le nom qui, à notre avis, exprimerait le mieux ce mode de fonctionnement, serait celui de *chaudières à petits bouilleurs*. Toutefois, désireux de ne pas introduire d'expressions nouvelles dans une matière qui en renferme déjà trop, nous conserverons, pour cette première catégorie, l'expression déjà reçue dans l'usage de *chaudières à circulation*, qui n'a d'autre défaut que de pouvoir au fond, ainsi que nous l'avons expliqué, convenir également aux autres appareils de cette classe.

1031 — Dans une seconde catégorie, nous rangerons des types extrêmement nombreux : de Naeyer, Babcok et Wilcox, etc., qui présentent tous un certain nombre de traits communs spécifiques, à savoir : une disposition généralement parallélépipédique, un réservoir spécial d'eau assez limité mais cependant encore notable, deux colonnes-mères pour la descente et la remontée de ce liquide et de la vapeur, enfin un jeu de tubes d'eau parallèles entre eux et plus ou moins inclinés sur l'horizon, destinés à établir individuellement la communication entre les deux colonnes.

Le nom de *chaudières à jeu d'orgue* caractériserait bien ce faisceau. Mais, pour le motif déjà indiqué, nous n'introduirons pas de mot nouveau, et nous affecterons à cette seconde catégorie le nom de *chaudières multitubulaires*, qui est déjà usité (concurremment avec ceux de *chaudières à petits éléments*, *chaudières à éléments multiples*, *générateurs inexplosibles*), bien qu'avec une extension plus grande que celle à laquelle nous le restreignons en ce moment.

1032 — Une troisième catégorie comprend enfin les *chaudières à serpentin*, dont la plus caractéristique est le type Belleville. Ici les tubes, au lieu de garder, comme dans les systèmes précédents, une individualité propre, concourent tous ensemble à une action unique. Ils sont en effet réunis bout à bout, et constituent un lit commun, que le courant doit parcourir d'un bout à l'autre.

Nous consacrerons à ces trois catégories les trois paragraphes suivants.

§ 2

CHAUDIÈRES A CIRCULATION

1033 — *Chaudière Field.* — L'un des types les plus répandus parmi les chaudières à circulation (¹) est celui du générateur

(¹) Robert Wilson. The circulation of water in steam boilers. *Scientific american supplement*, 12 avril 1890, p. 11 902. — *The Locomotive*, t. II, p. 1881. — *American Engineer*, 13 mai 1882, p. 217.

Chaudières à circulation : Bordoné. *Portefeuille économique des machines*, 3ᵉ série,

Field (¹). Il est vertical et à foyer intérieur (fig. 623). Le ciel est consolidé par des étriers, et percé de trous légèrement coniques,

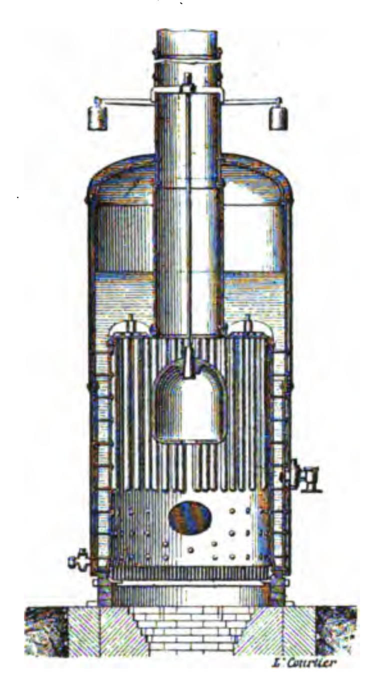
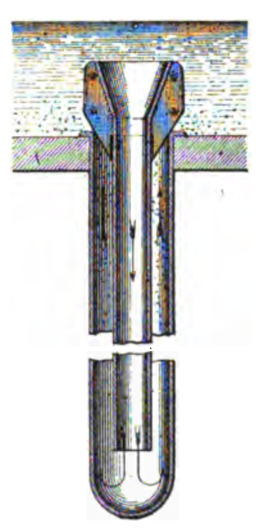



Fig. 623. — Chaudière Field. (Coupe verticale).

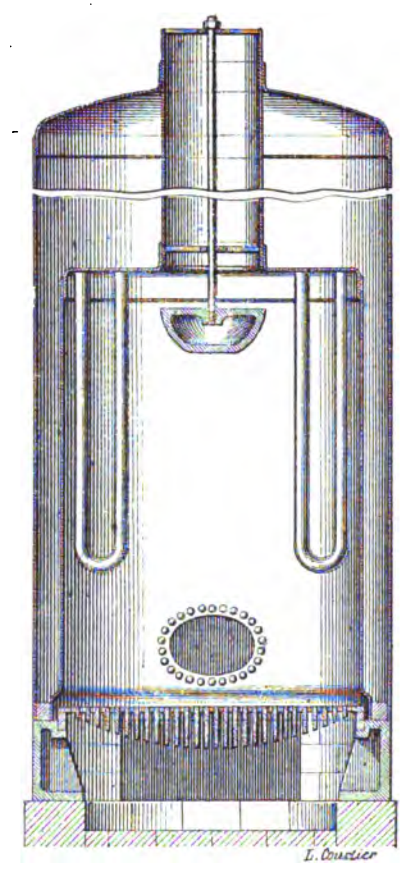

Fig. 624. — Tube Field. (Coupe verticale).

dans lesquels on mandrine des tubes d'une forme spéciale.

Ouverts par le bout, ils sont foncés à la partie inférieure comme

t. IX, p. 74. — Boutigny. Jacqmin. *Traité des machines à vapeur*, t. I, p. 114. — Chevalier. Péclet. *Traité de la chaleur*, t. II, p. 199. — Decker. *Revue industrielle*, 18 août 1880, p. 321. — Dulac (*Revue industrielle*, 14 décembre 1889, p. 493. — *Revue technique de l'Exposition de* 1889, 6ᵉ partie, t. I, p. 71). — Haupt. *American Machinist*, 3 mars 1883, p. 3. — Hervier. *Le Hérisson* (*Revue industrielle*, 23 mai 1883, p. 201. — *Génie civil*, 17 octobre 1885, p. 392. — Leperdrieux. *Bulletin technologique de la Société des anciens Élèves des Écoles d'arts et métiers*, 1884. — *Écho des mines et de la métallurgie*, 20 juin 1886). — Levet. *Revue industrielle*, 4 juin 1884, p. 221. — Lugand. *Bulletin de l'Association scientifique de France*, 22 août 1875, p. 308. — Mounier. *Revue industrielle*, 1ᵉʳ octobre 1879, p. 383. — Rickers. *Les Mondes*, t. XLI, p. 505; XLVII, 134. — Rocour. *Revue technique de l'Exposition de* 1879, 6ᵉ partie, t. I, p. 519. — Smith. *Engineering*, 25 juillet 1879, p. 69. — Sterlik et Meyer. *Chronique industrielle*, 10 mars 1888, p. 125.

(¹) *Portefeuille économique des machines*, 1886, pl. 35, 39, 46. — Hirsch et Debize. *Leçons sur les machines à vapeur*, t. I, p. 624. — Ser. *Physique industrielle*, t. II, p. 108.



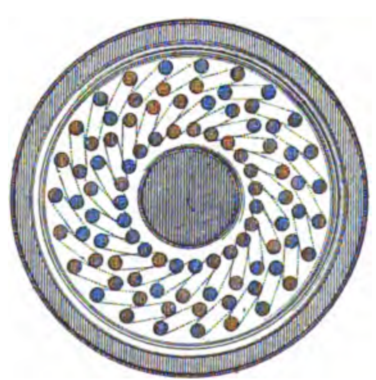


Fig. 625 et 626. — Chaudière Thirion. (Plan et élévation).

une éprouvette (fig. 624). A leur intérieur sont disposés d'autres tubes ouverts aux deux bouts. L'extrémité supérieure de ces derniers est évasée en forme d'entonnoir, et porte des ailettes qui les retiennent sur l'orifice des éprouvettes. L'eau la moins chaude descend à travers le tube intérieur, appelée par l'ascension de la couronne liquide qui se trouve comprise entre les deux parois; laquelle s'échauffe par le contact des flammes, devient moins dense, et ne saurait dès lors rester stagnante, en vertu du principe de l'équilibre des vases communicants. On crée ainsi un véritable thermo-siphon.

Ce dispositif laisse les dilatations absolument libres. En revanche l'appareil est, comme tous ceux de cette catégorie, assez impressionnable aux irrégularités de la combustion. En outre il n'est garanti contre l'obstruction par les dépôts, dans des passages aussi étroits, que par la rapidité du courant qui s'y établit. Les troubles ne peuvent s'y arrêter, et vont se déposer dans des régions

plus calmes, d'où on les retire à l'aide de purges périodiques. Mais pendant les arrêts la vitesse diminue, et l'on se trouve alors exposé à des engorgements, qui risquent de se calciner et d'entartrer définitivement les organes.

1034 — Dans la *chaudière Imbert* [1], au lieu d'assembler les tubes aussi solidement que pour le type Field proprement dit, on les installe d'une manière moins rigide dans des logements coniques, sur lesquels la pression tend à les maintenir. Quelques coups de marteau en dessous suffisent à desserrer l'assemblage, au moment des nettoyages.

1035 — *Chaudière Thirion.* — Le générateur Thirion [2], très employé pour les pompes à incendie à vapeur, est analogue à celui de Field pour sa disposition d'ensemble; mais la forme de ses organes spéciaux de volatilisation est différente (fig. 625, 626).

Ils affectent la forme de tubes en U, dont les deux branches ont des diamètres légèrement différents. Le flux de chaleur étant proportionnel à la surface, c'est-à-dire au rayon, et la masse d'eau à échauffer variant en raison du volume, ou du carré de ce même rayon, la répartition du calorique dans le liquide ne s'opère pas également pour les deux parties; d'où résulte une tendance ascensionnelle.

1036 — *Chaudière De Dion, Bouton et Trépardoux.* — Ce générateur vertical [3] est formé de trois enveloppes concentriques (fig. 627). Le bouilleur central et l'enceinte périphérique sont réunis par un faisceau de tubes rayonnants qui sont légèrement inclinés sur l'horizon, au lieu d'être verticaux comme dans les exemples précédents. Chacun d'eux se trouve placé au-dessus de l'intervalle de ceux qui lui sont subordonnés, afin de rompre l'ascension du courant gazeux et d'en déterminer le brassage. Le bouilleur central

[1] Hirsch et Debize. *Leçons sur les machines à vapeur*, t. I, p. 625.
[2] Congrès de mécanique appliquée de 1889, t. III, p. 95.
[3] Ser. *Physique industrielle*, t. II, p. 109.

est cloisonné par une tôle horizontale, isolant à sa partie supérieure un compartiment où la vapeur se rend à travers les tubes les plus élevés, en se séchant dans la colonne des gaz chauds. Quatre autoclaves sont répartis sur le pourtour du tronçon inférieur, et un cinquième sur le sommet. La disposition rayonnante, en encombrant la région centrale, détermine une tendance du gaz à circuler de préférence vers la circonférence; mais inversement le tirage le rappelle vers l'axe, et cet antagonisme produit une répartition plus égale. Les tubes sont courts, ce qui diminue l'importance des dilatations.

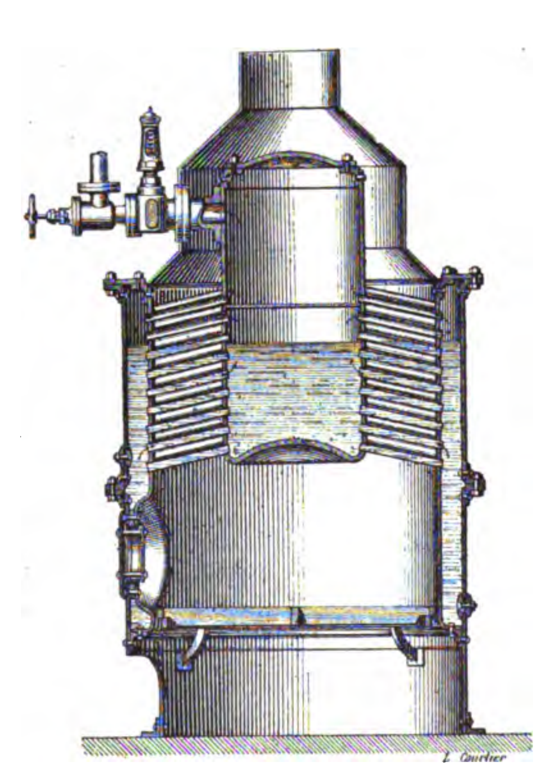


Fig. 627. — Chaudière De Dion, Bouton et Trépardoux. (Coupe verticale).

1037 — *Circulateur Weyr.* — Le principe de la circulation intensive est utile non seulement pour le fonctionnement normal, mais pour la phase même de *montée en pression*, qu'il y a lieu parfois de rendre exceptionnellement rapide, et que l'on a toujours intérêt, avec n'importe quel générateur, à ne pas se laisser se prolonger trop longtemps. On a introduit dans ce but divers appareils, parmi lesquels je me borne à une simple mention du *circulateur* ou *hydrokineter* de Weyr [1].

[1] Circulateurs : Weyr (*Portefeuille économique des machines*, 3e série, t. XIV, p. 78. — *Chronique industrielle*, 2 juin 1889, p. 256). — W. Craig. *Revue industrielle.*

On désigne sous ce nom un jeu d'ajutages successifs (n° 1119), entre lesquels l'eau se trouve appelée dans l'axe commun par l'injection de vapeur provenant d'un petit générateur, qui sert à mettre en train les grandes chaudières d'un steamer, par exemple. L'appareil est disposé tangentiellement à la direction dans laquelle on désire amorcer le courant circulatoire, et détermine progressivement un mouvement très actif.

§ 3

CHAUDIÈRES MULTITUBULAIRES

1038 — *Généralités.* — Nous avons déjà esquissé (n° 1031) les lignes principales qui caractérisent ces appareils (¹). Malgré l'épithète d'inexplosible, aujourd'hui consacrée par l'usage (²), ils sont

5 novembre 1885, p. 449. — DALGLISH. *The Steamship*, 1er juillet 1889, p. 23. — THOMPSON. *Ibidem*, 1er août 1889, p. 53.

(¹) Olry. Les chaudières à petits éléments. Rapport au Congrès international de mécanique appliquée de 1889. *Revue technique de l'Exposition de* 1889, 6e série, t. I. — Demoulin. Application des multitubulaires à la marine. *Génie civil*, 11 janvier 1890, p. 253. — Dupont. Chaudières de torpilleurs. *Mémorial du Génie maritime*, 1885, 4e livraison. — Thurston. On a trial of a water tube boiler. *Scientific American, supplement*, 14 avril 1888, p. 10234.

(²) Chaudières inexplosibles : ALMY. *American Machinist*, 17 décembre 1891, p. 1 — ARCHAMBAULT. *Revue technique de l'Exposition de* 1889, 6e partie, t. I, p. 261. — BARLOW. Thurston. *Histoire de la machine à vapeur*. Traduction Hirsch, t. II, p. 35. — BÈDE. *Portefeuille économique des machines*, 1881, pl. 11. — BÜTTNER (*Revue industrielle*, 1880, p. 441. — *Engineering*, 8 juillet 1881, p. 27). — CADIAT (Rapport de M. Brull. *Bulletin de la Société d'encouragement*, décembre 1887, p. 734. — Armengaud. *Publication industrielle*, t. XXVI. — *Portefeuille économique des machines*, 3e série, t. X, p. 138). — CALDWELL. *American Machinist*, 2 avril 1891, p. 4. — CARVILLE (Rapport de Tresca. *Bulletin de la Société d'Encouragement*, 14 février 1868. — *Portefeuille économique des machines*, 1868, pl. 5). — CHARLES et BABILOT. *Revue technique de l'Exposition de* 1889, 6e partie, t. I, p. 242. — CHASE. *American Machinist*, 28 août 1890, p. 5. — CESTES. *Revue industrielle*, 3 mars 1887, p. 85. — CLAPP. *American Machinist*, 7 mai 1887, p. 1. — CLARKE et SAVAGE. *Scientific American*, 18 mai 1889, p. 306. — COLLET (*Revue technique de l'Exposition de* 1889, 6e partie, t. I, p. 190. — *Journal de la meunerie*, décembre 1890, p. 92. — Ser. *Physique industrielle*, t. II, p. 99) (fig. 634). — CONEKIN. *Scientific American*, 20 septembre 1890, p. 178. — DUFOUR. *Les Mondes*, t. XXXVII, p. 704. — DUNN. *Portefeuille économique des machines*, 1863, pl. 29 et 30. — DURENNE. *Ibidem*, p. 283. — DURR. *Engineering*, 29 mai 1891, p. 640. — EVERDING et JENKS. *Revue industrielle*, 20 octobre 1880, p. 413. — FITCH. Thurston. *Histoire de la machine à vapeur*. Traduction Hirsch, t. II, p. 19. — FONTAINE. *Revue technique de l'Exposition de* 1889, 6e partie, t. I, p. 153. — GENTRY. *Scientific Ame-*

incontestablement, comme tous les autres, susceptibles de donner

rican, 11 février 1888, p. 89. — GLOBE. *American Machinist*, 19 décembre 1889, p. 7 — GOHRING et LECNKS. *Engineering*, 29 mai 1891, p. 640. — GRIFFITH. *The Engineer*, 1874. p. 150. — GRIMALDI. *Portefeuille économique des machines*, 1863, pl. 29 et 30. — HALL *Revue industrielle*, 6 février 1884, p. 59. — HANREZ. Thibaut (*Note sur le générateur tubulaire de Prosper Hanrez*, in-8°. — Tahon. Note sur le générateur multitubulaire Hanrez. *Bulletin de la Société industrielle de l'Est*, 1891). — HEINE. *Revue industrielle*, 4 juin 1879, p. 212. — HERMANN (*Engineering*, 29 mai 1891, p. 840. — Ser. *Physique industrielle*, t. II, p. 94). — HERRESHOF (*Les Mondes*, t. XLVIII, p. 602. — *L'Aéronaute*, avril 1879, p. 95. — *Engineering*, 7 février, 11 avril 1879. — *The railroad and engineering Journal*, août 1890, p. 346). — HERVIER. *Annales industrielles*, 1883, t. II, p. 569. — HOWARD (Laurent et Dunkel. *Traité des chaudières à vapeur*, p. 124. — Chabaud. *Bulletin de la Société de l'industrie minérale de Saint-Étienne*, 2e série, t. III, p. 121. — *Engineering*, 1874, p. 73). — JARROW. *Ibidem*, 16 janvier 1891, p. 81. — ISHERWOOD. *Journal of Franklin Institute*, 7 janvier 1879, p. 12. — JOLY. Jacqmin *Traité des machines à vapeur*, t. I, p. 112. — KELLOG. *American Machinist*, 12 mars 1887. — KINGSLEY. *Ibidem*, 10 novembre 1888, p. 1. — KREBS et DURENNE. Rapport Brull. *Bulletin de la Société d'encouragement*, 1892. — LACROIX. *Revue technique de l'Exposition de* 1889, 6e partie, t. I, p. 249. — LAGASSE et BOUCHÉ (*Ibidem*, p. 120. — *Revue industrielle*, 14 janvier 1888, p. 15. — *Portefeuille économique des machines*, 3e série, t. XIII, p. 98. — Ser. *Physique industrielle*, t. II, p. 95). — LAGRAFEL et D'ALLEST. *Congrès de mécanique appliquée de* 1889, t. III, p. 121. — LARMANJAT. Jacqmin. *Traité des machines à vapeur*, t. I, p. 111. — MELVIN. *American Machinist*, 26 mars 1881, p. 4. — MONTUPET. *Revue technique de l'Exposition de* 1889, 6e partie, t. I, p. 256. — MOORE. *American Machinist*, 19 décembre 1885, p. 1. — MORRIS. *Ibidem*, 28 mars 1889, p. 1. — NATU. *Revue industrielle*, 4 février 1886, p. 55. — ORIOLLE (*Ibidem*, 28 avril 1888, p. 161. — *Portefeuille économique des machines*, 3e série, t. XIII, p. 130. — *Annales industrielles*, 1885, p. 578. — *Revue technique de l'Exposition de* 1889, 6e partie, t. I, p. 184. — *Association française pour l'avancement des sciences*, Congrès de Paris, 1878, p. 277. — Ser. *Physique industrielle*, t. II, p. 105). — PIEDBOEUF. *Revue industrielle*, 1880, p. 441. — POOLE et HUNT. *American Machinist*, 5 janvier 1884, p. 3. — PRÉGARDIEN (*Revue industrielle*, 10 novembre 1880, p. 443. — *Bulletin de la Société d'encouragement*, novembre 1885, p. 573. — *Dingler's polytechniches journal*, t. CCLIV, p. 415). — PRESSARD (*Revue industrielle*, 20 juillet 1889, p. 281. — *Revue technique de l'Exposition de* 1889, 6e partie, t. I, p. 200). — READ. Thurston. *Histoire de la machine à vapeur*. Traduction Hirsch, t. II, p. 24. — ROOT (*Revue technique de l'Exposition de* 1889, 6e partie, t. I, p. 165. — Ser. *Physique industrielle*, t. II, p. 83. — *Engineering*, 24 octobre 1890, p. 484. — *American Machinist*, 2 février 1884; 1er et 13 mars 1886. — *Scientific American*, 20 novembre 1886, p. 322) (fig. 631). — ROWAN. *Génie civil*, t. XIX, p. 424. — SCHUTTE et GAEHRING. *American Machinist*, 4 mars 1882, p. 5. — SIMONIS et LANG. *Engineering*, 29 mai 1891, p. 640. — SINCLAIR (*Portefeuille économique des machines*, 1879, pl. 5. — *Iron*, 26 avril 1879, p. 517). — SOLWAY et HANREZ. *Revue industrielle*, 27 octobre 1880, p. 423. — STEINMULLER (*Revue industrielle*, 10 novembre 1880, p. 441. — *Engineering*, 24 juin 1881, p. 644; 29 mai 1891, p. 640; 5 juin 1891, p. 672). — STEVENS. Thurston. *Histoire de la machine à vapeur*. Traduction Hirsch, t. II, p. 42. — TAYLOR. *American Machinist*, 23 janvier 1890, p, 7. — TWAITE. *Revue industrielle*, 13 avril 1889, p. 145. — WAKE et PASSMANN. *Chronique industrielle*, 20 janvier 1889, p. 39. — WALTHER. *Engineering*, 24 juin 1881, p. 644. — WARD (*American Machinist*, 27 août 1881, p. 4. — *Engineering*, 5 avril 1889). — WATESO. *Les Mondes*, t. XXII, p. 355. — WILMANN. *Chronique industrielle*, 6 mai 1888, p. 222. — *Engineering*, 29 mai 1891, p. 640).

lieu à des incidents et de subir des avaries; mais il est juste d'ajouter que les conséquences en demeurent toujours limitées, et que les grands désastres sont écartés par leur emploi (n° 1157). Il n'y a ordinairement à enregistrer que des ruptures de tubes, et l'on évite en grande partie les torrents d'eau bouillante et de vapeur qui brûlent mortellement les chauffeurs, ainsi que les paniques qui peuvent devenir à elles seules un grand péril dans les locaux où des foules se trouvent réunies.

Cette qualité n'acquiert cependant toute sa valeur que pour le type à serpentin, d'où disparaît définitivement tout réservoir spécial. Dans les chaudières composites qui nous occupent en ce moment, le réservoir d'eau existe encore, bien qu'ayant décru progressivement d'importance par rapport aux catégories du chapitre précédent. Il fournit encore ici un niveau liquide bien déterminé. Il sert à précipiter, à l'abri de la calcination, la majeure partie des dépôts par l'action de la température (n° 1137). Il fait volant de chaleur pour combattre la grande instabilité du régime. Mais comme contrepoids à ces avantages, il représente encore un élément de danger. Tout au moins doit-il, pour ce motif, être soustrait à l'attaque directe des flammes, contrairement à ce que l'on a cru pouvoir risquer dans certains types particuliers.

En vue de diminuer encore le péril, on a introduit la *forme sectionnelle*. Elle permet de constituer un ensemble d'une puissance notable par la juxtaposition de petites chaudières distinctes. On espère pouvoir ainsi limiter les suites d'un accident à celui de ces éléments qui aurait périclité; ce qui n'est vrai cependant que dans une certaine mesure, en raison de leur corrélation commune avec le collecteur général.

1039 — La circulation intensive indispensable à ces appareils résulte des soins que l'on donne tout à la fois au mouvement des gaz chauds à l'extérieur des tubes, et à ceux que prennent les fluides dans leur intérieur. Examinons-les successivement.

En ce qui concerne ce dernier point, l'on doit rechercher la netteté des effets à produire, et s'attacher à éviter tout antagonisme entre les tendances spontanées de l'eau et de la vapeur.

Une inclinaison notable des tubes aide au dégagement de celle-ci. Son ascension avec l'eau, qu'elle rend mousseuse, s'effectue à travers celle des deux colonnes sur laquelle s'embranchent les parties supérieures des tubes. L'autre est destinée à la descente du liquide du réservoir.

Ordinairement les colonnes sont formées d'enveloppes métalliques distinctes, sur lesquelles viennent s'assembler les tubes, individuellement ou par couples. D'autres fois ces conduits résultent seulement de la superposition des boîtes de communication. Trop souvent l'on emploie encore la fonte pour les parties compliquées de cet ensemble ([1]). On doit applaudir aux efforts qui sont faits par l'industrie en vue d'éliminer ce métal, malgré les difficultés d'exécution.

1040 — Quant aux gaz chauds, on en facilite le brassage en croisant les tubes en quinconce et en les déjetant successivement, au lieu de les disposer dans des plans verticaux entre lesquels les flammes s'élèvent trop facilement. On resserre les intervalles pour multiplier les contacts de la masse fluide et du métal. Afin de favoriser le mélange, on adopte quelquefois pour les tubes des inclinaisons opposées.

1041 — Les avantages que l'on revendique en faveur des chaudières à petits éléments sont nombreux et importants.

En première ligne, il faut rappeler l'accroissement de la sécurité, sur lequel nous avons déjà insisté. On en peut rapprocher, comme conséquence, certaines facilités administratives dont bénéficient ces générateurs.

Le transport est lui-même beaucoup facilité. Ces appareils sont en effet décomposables, à l'inverse des corps cylindriques qui sont essentiellement indivisibles. Sans parler des contrées où les moyens de transports sont restés plus ou moins primitifs, et dans lesquelles on ne pourrait même pas concevoir la pensée de faire voyager des

([1]) La chaudière Harrison est entièrement constituée par des files de boules creuses en fonte (Thurston. *Histoire de la machine à vapeur*, traduction Hirsch, t. II, p. 123. — Jacqmin. *Traité des machines à vapeur*, t. I, p. 111).

objets tels que ces grands corps cylindriques, les voies de communication ordinaires ne possèdent pas dans tous les ports, dans toutes les gares, les engins nécessaires pour le chargement et le déchargement de telles pièces.

La diminution de l'emplacement est notable. Au lieu d'être étalée sur un grand espace, comme avec les corps cylindriques, la surface de chauffe se trouve ramassée dans un volume restreint. Or le terrain coûte cher dans les centres industriels, quand on veut créer un établissement. S'il s'agit d'une usine déjà formée, l'encombrement y est ordinairement très grand, et ne permet pas aisément l'installation de volumineux appareils. Dans le cas contraire, on sera toujours heureux de pouvoir faire bénéficier d'autres services de l'économie qui aura été ainsi réalisée sur celui de la production de la vapeur.

Les maçonneries sont supprimées, et avec elles les rentrées d'air, les fuites de gaz, les pertes sur la chaleur emmagasinée, la gêne que ces massifs apportent aux visites, les corrosions dont leur contact devient souvent le siège, l'obligation de les réparer, de les démolir périodiquement et de les reconstruire.

L'économie de poids est notable. A terre, elle simplifie les fondations ; dans la marine, elle est d'une importance décisive.

Si l'on compare en particulier les inexplosibles aux chaudières tubulaires, on y retrouve, encore plus accusées, une partie des propriétés de ces dernières. Toutefois le tirage est meilleur, les sections étant plus larges.

La montée en pression est rapide. L'activité de la circulation tend à uniformiser la température et les dilatations. La solidité relative des petits éléments favorise l'emploi des hautes pressions, qui est par lui-même avantageux (1). Les anciens types ne peuvent lutter sur ce terrain qu'au prix d'une augmentation des épaisseurs et du poids, et en aggravant encore les conséquences des explosions. Déjà réduites ici par la diminution du volume de l'eau, elles le sont encore par cette circonstance que l'évacuation devient plus progressive, en raison des circuits que les fluides ont à parcourir pour se rendre à l'ouverture d'échappement.

(1) Voy. t. I, p. 816.

La température finale des gaz s'abaisse plus facilement. Au lieu du chiffre de 300 degrés, qui est ordinaire avec les anciens types, on arrive à 200, et l'on peut même approcher de 100 en soignant le chauffage de l'eau d'alimentation par les gaz.

1042 — En compensation de tels avantages, on ne saurait passer sous silence quelques inconvénients.

L'atténuation de la gravité des accidents ne s'étend pas à leur fréquence. Il semble, d'après la statistique, que la différence soit plutôt en sens contraire ; ce qui s'explique très naturellement par la complication même des nouveaux appareils. Cette situation ne pourra d'ailleurs que s'améliorer progressivement avec une plus longue expérience des constructeurs et des conducteurs.

La grande diminution du volume d'eau et la suppression des maçonneries entraînent comme conséquence une notable instabilité de régime ; ce qui exige l'emploi de chauffeurs particulièrement soigneux et expérimentés, ainsi qu'une surveillance très active. L'abaissement du niveau est rapide en cas de négligence. On est plus exposé aux coups de feu. Le primage est sensible. L'entartrement est à redouter pour d'aussi faibles diamètres. La fréquence des nettoyages devient plus nécessaire encore qu'avec les anciens types.

1043 — *Chaudière de Naeyer.* — La chaudière de Naeyer ([1]) comprend (fig. 628, 629, 630) : 1° une grille de 2 mètres environ de largeur, légèrement inclinée vers l'arrière, et comprise entre des parois en maçonnerie percées de portes pour le nettoyage ; 2° un réservoir supérieur d'eau et de vapeur, dans lequel se trouve le niveau liquide bien déterminé qui est indiqué au dehors par le tube de cristal (n° 1202); 3° un faisceau tubulé incliné de 0 m. 20 par mètre de l'avant vers l'arrière, et sectionné en séries verticales distinctes et juxtaposées.

([1]) *Revue industrielle*, 1881, p. 433. — *Revue technique de l'Exposition universelle de* 1889, 6e partie, t. I, p. 98. — Armengaud. *Publication industrielle*, 32e volume, p. 169. — Hirsch et Debize. *Leçons sur les machines à vapeur*, t. I, p. 618. — Ser. *Physique industrielle*, t. II, p. 88. — Vinçotte. *Journal of Franklin Institute*, décembre 1880, p. 361.

Ces diverses sections reposent par leur angle inférieur sur un caisson creux en fonte ou en acier, destiné à répartir entre elles l'eau d'alimentation. Un caisson semblable, opposé en diagonale au premier, réunit les têtes supérieures de ces mêmes séries, et joue le rôle de collecteur de vapeur. Deux cols-de-cygne, situés de part et d'autre du réservoir supérieur, y déversent cette vapeur au-dessus du plan d'eau. A l'extrémité opposée, dans la région inférieure

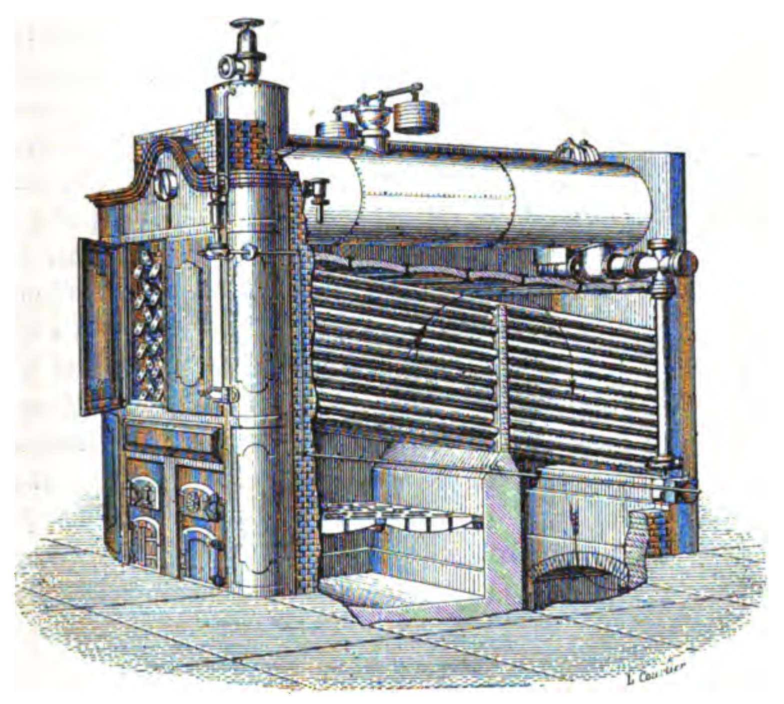


Fig. 628. — Chaudière de Nacyer (vue perspective).

du réservoir, deux tuyaux établissent de la même manière la communication entre le liquide qui s'y trouve et le caisson inférieur, de manière à compléter le circuit.

Chaque série est elle-même composée d'éléments superposés, et un peu déjetés alternativement de part et d'autre. Cette disposition en quinconce est destinée, concurremment avec un système de chicanes, à mieux brasser les flammes. Chaque élément est formé de deux tubes compris dans un même plan incliné. Ils communi-

quent ensemble à leurs extrémités, au moyen de boîtes horizontales de forme rectangulaire. D'un élément au suivant, la relation se trouve établie par des pièces de raccord comprises dans les plans de façade, et alternativement inclinées d'un côté et de l'autre, à cause de la disposition en quinconce (fig. 629). Chaque élément se trouve ainsi relié à la fois aux deux autres qui lui sont immédiatement contigus, l'un inférieur, l'autre supérieur.



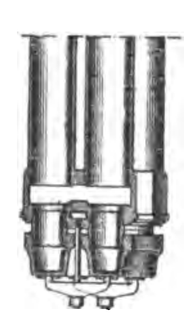


Fig. 629 et 630. Chaudière de Naeyer. (Détail des boîtes).

Les tubes ont un diamètre maximum de 120 millimètres, et une épaisseur de 5. Leur longueur varie de 3 à 5 mètres. On les essaye à la pression hydraulique de 40 kilogrammes. Ils sont matés à froid sur les boîtes horizontales. En face de chacun d'eux se trouve pratiquée dans la paroi de cette boîte une ouverture, dans laquelle on enfonce à force une bague à double cône. Sur cette dernière s'applique la pièce de raccord oblique. L'assemblage est maintenu au moyen d'un étrier serré par un écrou. Ce système est bien étanche quand les boulons sont suffisamment serrés contre les arcades; et en même temps il est facile à démonter pour les nettoyages. Il est préservé contre l'action des flammes par la superposition des boîtes, qui forment écran. Chaque pièce de réunion est ainsi maintenue par deux arcades. En outre, en cas de projection, elle serait arrêtée par les portes métalliques.

1044 — L'alimentation s'effectue dans le réservoir supérieur. Le liquide commence par le traverser suivant sa longueur, à travers un tuyau plongé dans l'eau chaude. Il opère son déversement devant le débouché de la vapeur, et se trouve ainsi saisi dès son entrée par la température. Cette influence a pour résultat de précipiter une grande partie des sels calcaires à l'état de boues qui se réunissent dans une poche spéciale, vidée de temps en temps à l'aide d'un purgeur.

L'eau, ainsi purifiée en partie, gagne par les deux grands tuyaux

d'arrière, les extrémités de collecteurs inférieurs, destinés à la répartir entre les diverses séries sectionnelles. Dans chacune de ces dernières, le fluide s'élève à travers les pièces obliques de communication jusqu'aux divers éléments tubulaires qui composent cette série. La particule que nous suivons par la pensée s'engage ainsi dans l'un de ces éléments vaporisateurs, et regagne, à travers la

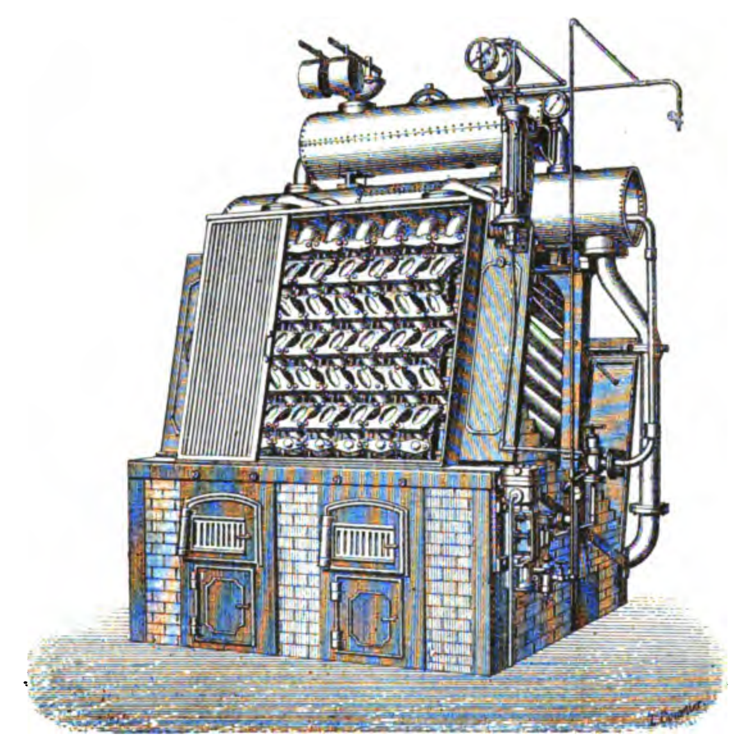


Fig. 631. — Chaudière Root (vue perspective).

seconde colonne en zigzag, le réservoir supérieur. Elle parcourt en définitive un trajet qui garde à peu près la même longueur, quel que soit l'élément traversé.

La sortie de la vapeur au milieu du déversement de l'eau d'alimentation contribue à la charger d'humidité. La prise de vapeur s'effectue à l'aide d'un dôme qui surmonte le récipient supérieur. Ce fluide se sèche ensuite dans des tubes réchauffeurs au milieu

du gaz chaud, avant de pénétrer dans la conduite générale de l'usine.

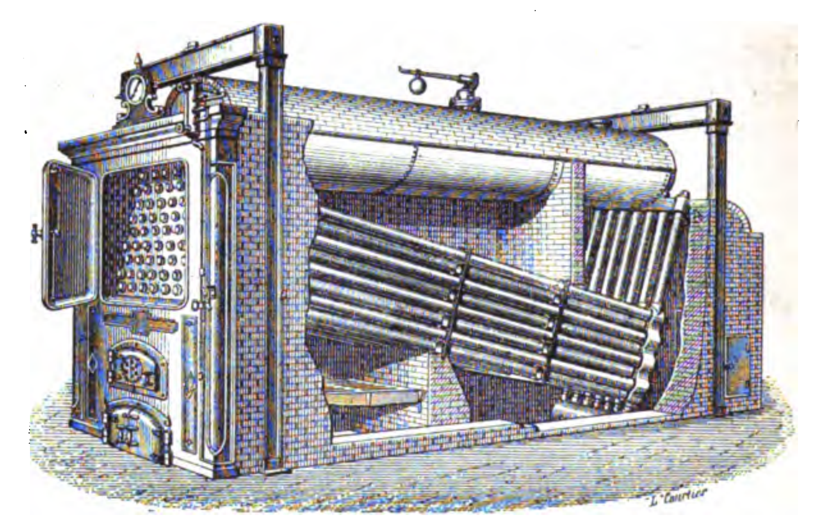


Fig. 632. — Chaudière Babcock et Wilcox (vue perspective).

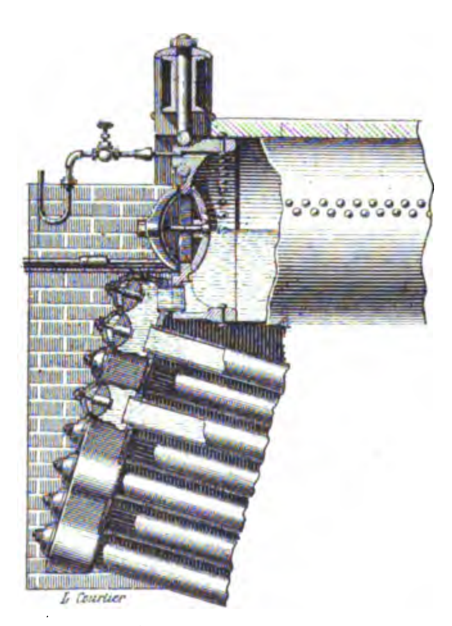


Fig. 633. — Chaudière Babcock et Wilcox (détail des assemblages).

1045 — *Chaudière Babcock et Wilcox.* — Le générateur Bab-

cock et Wilcox [1] comprend (fig. 632, 633) : 1° une grille penchée légèrement vers l'arrière ; 2° un faisceau tubulé très incliné dans le même sens ; 3° suivant l'arête inférieure de ce dernier, un collecteur pour les boues précipitées par l'impression de la chaleur dans les eaux d'alimentation ; 4° tangentiellement à son arête supérieure, un volumineux récipient d'eau et de vapeur ; 5° au-dessus de ce

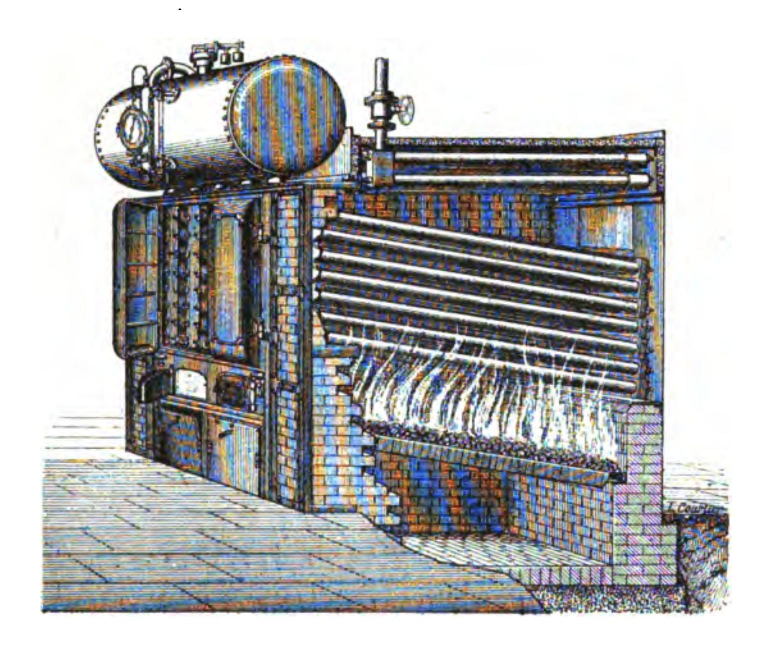


Fig. 634. — Chaudière Collet (vue perspective).

dernier enfin, un sécheur de vapeur. L'ensemble est supporté par deux tréteaux en fer, et reste indépendant des maçonneries.

Le faisceau est sectionnel, et composé de séries verticales distinctes et juxtaposées. Chacune de ces dernières est formée de tubes parallèles que réunissent deux caisses perpendiculaires en leurs extrémités. Celle d'arrière leur amène l'eau d'un collecteur trans-

[1] *Génie civil*, 27 juin 1891, p. 144. — *Revue industrielle*, 1881, p. 433 ; 1883, 121. — Armengaud. *Publication industrielle*, 1888. — *Revue technique de l'Exposition de* 1888, 6e partie, t. I, p. 134. — Ser. *Physique industrielle*, t. II, p. 95 — Hirsch et Debize. *Leçons sur les machines à vapeur*, t. I, p. 621. — *Engineering*, 1er mars 1885, p. 478 ; 22 mai 1891, p. 616.

versal, qui la reçoit lui-même du réservoir supérieur. Celle d'avant recueille la vapeur dégagée de chaque tube, et la conduit à un collecteur semblable qui la rend à ce réservoir. Ces deux caisses présentent une forme sinueuse, afin de permettre, pour les tubes qui s'y trouvent implantés, la disposition en quinconce. Les tubes y sont dudgeonnés dans des trous soigneusement alésés. La paroi opposée de chaque caisse est de même percée de trous situés en regard des premiers. On les ferme à l'aide d'obturateurs autoclaves placés au dehors de la caisse, à l'abri des flammes.

L'alimentation se fait dans le réservoir d'eau et de vapeur, comme pour le type précédent, et la circulation de l'eau s'opère d'une manière analogue. Quant à celle des flammes, on la prolonge en séparant en plusieurs groupes distincts, à l'aide de murettes, l'ensemble des séries qui composent le faisceau. Les gaz sont obligés par ces chicanes de monter et de descendre alternativement.

1046 — *Chaudières diverses.* — Les tubes et leur mode de groupement se compliquent plus ou moins dans certains types, dont nous esquisserons encore quelques exemples.

Les tubes d'eau de la *chaudière Roser* [1] sont traversés dans toute leur longueur par des tubes de fumée ouverts aux deux bouts (fig. 635, 636), et jouant, par rapport à eux, le même rôle que le foyer intérieur pour les générateurs de Cornouailles.

L'alimentation se fait dans un réservoir supérieur. L'eau descend directement à un collecteur-déjecteur placé en contrebas, remonte par la colonne d'arrière, s'engage dans les tubes annulaires, et s'élève avec la vapeur à travers la colonne antérieure jusqu'au réservoir qui lui a servi de point de départ. La vapeur passe ensuite dans un sécheur.

Quant aux gaz, ils s'élèvent au-dessus de la grille entre les séries de tubes vaporisateurs, redescendent dans un compartiment postérieur pour s'engager dans les tuyaux intérieurs. Revenus à la partie antérieure de l'appareil, ils montent jusqu'au réservoir, et arrivent enfin à la cheminée.

[1] *Chronique industrielle*, 18 avril 1886, p. 180. — *Revue technique de l'Exposition de* 1889, 6e partie, t. I, p. 111. — Ser. *Physique industrielle*, t. II, p. 98.

1047 — Dans le *générateur Bourgois et Lencauchez* (1), les deux

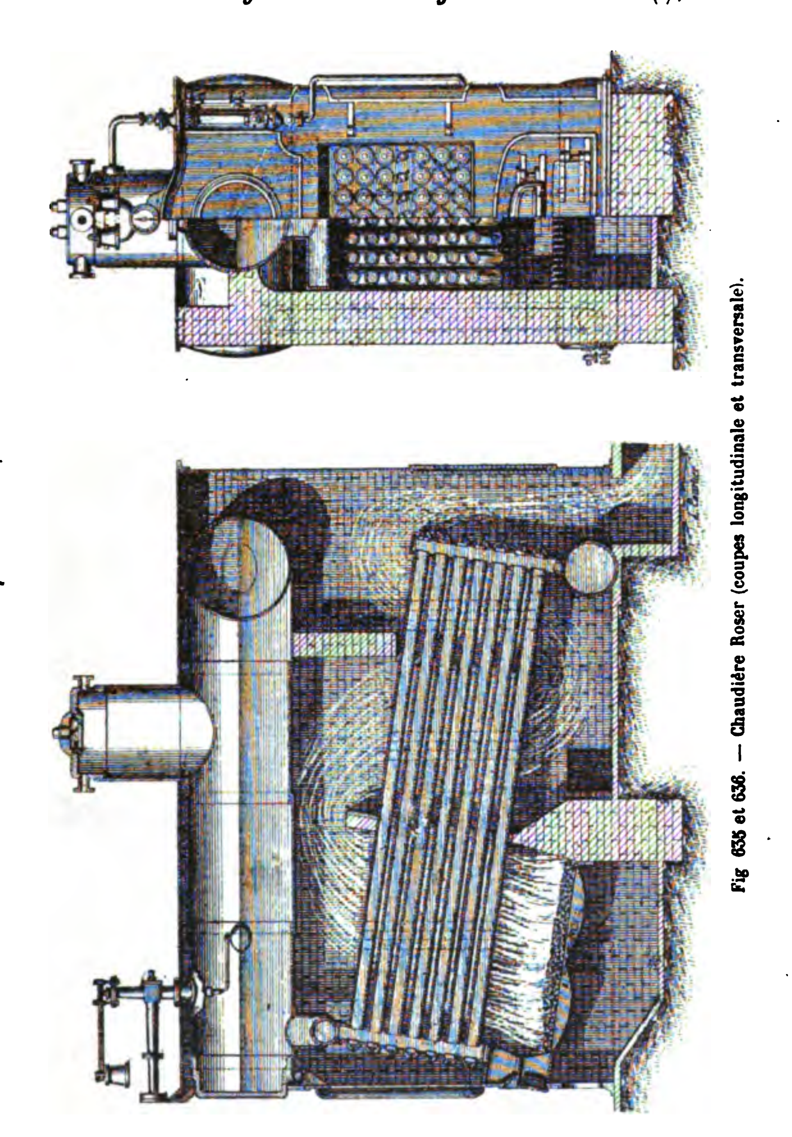


Fig 635 et 636. — Chaudière Roser (coupes longitudinale et transversale).

tubes qui composent un même élément présentent des inclinaisons

(1) *Revue industrielle*, 12 avril 1890, p. 144. — *Revue technique de l'Exposition de* 1889, 6e partie, t. I, p. 288. — *La Métallurgie*, 1890, p. 1773. — Ser. *Physique industrielle*, t. II, p. 95. — *Portefeuille économique des machines*, 1877, pl. 4.

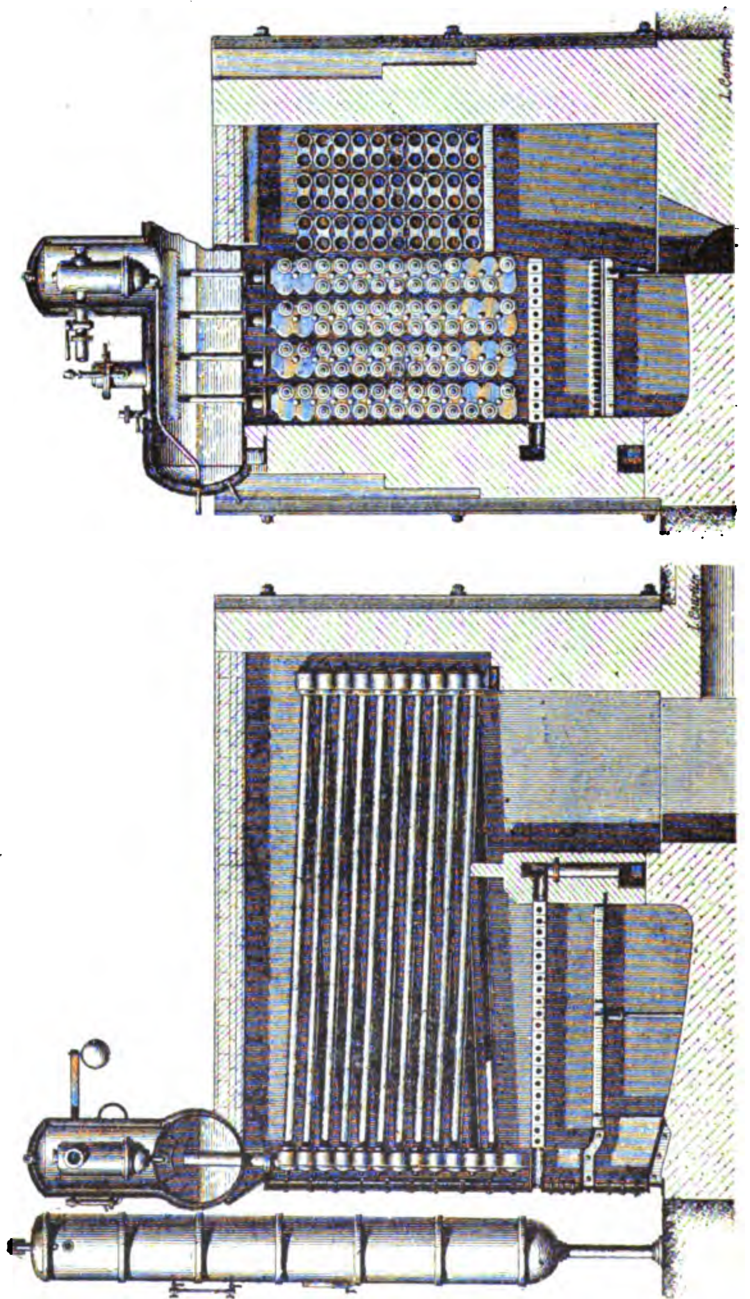


Fig. 637 et 638. — Chaudière Bourgois et Lencauchez (coupes longitudinale et transversale).

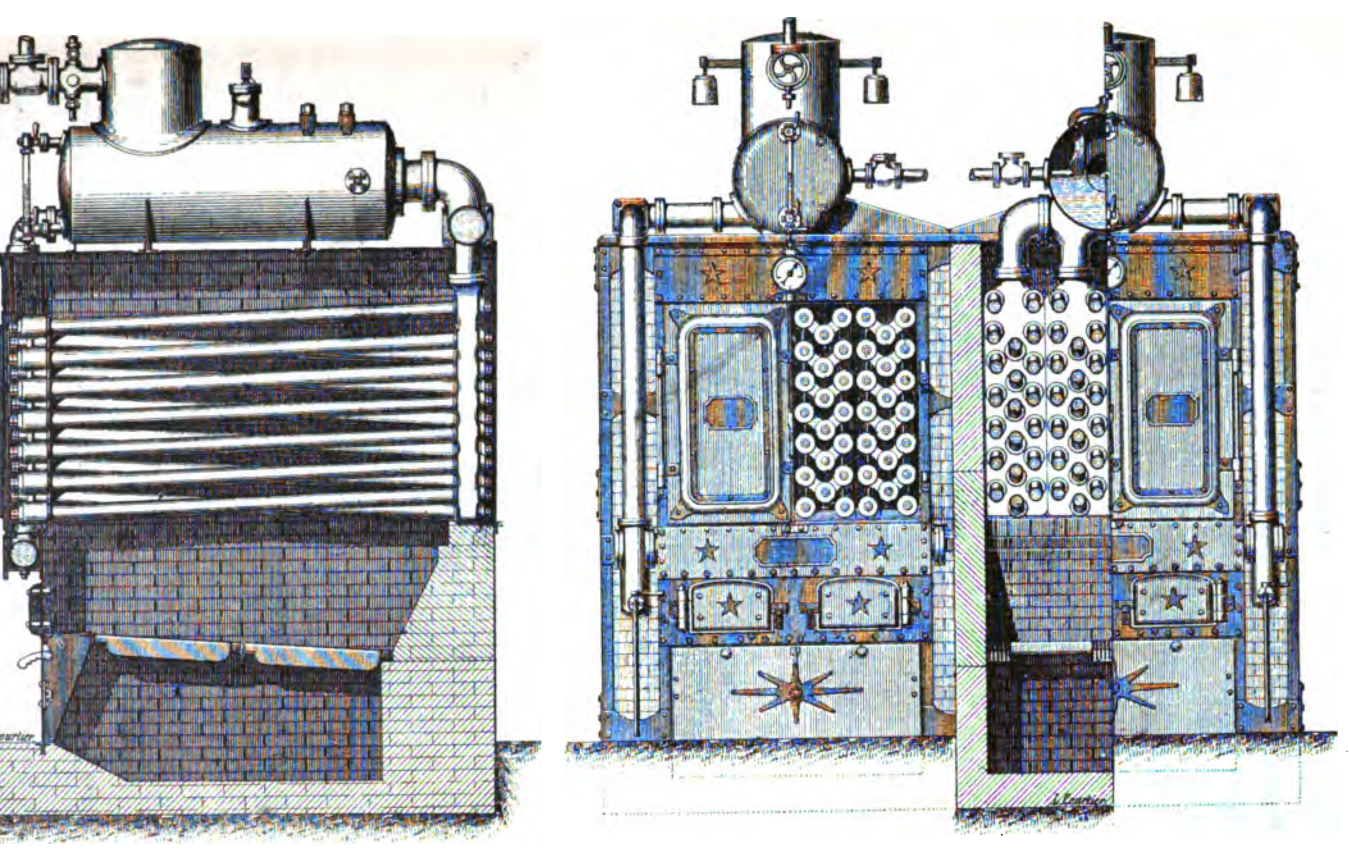


Fig. 639, 640, 641. — Chaudière Terme et Deharbe (élévations latérale et antérieure, coupe transversale).

opposées (fig. 637, 638). Ils sont réunis par une boîte de communication à leur extrémité libre. Chacun des éléments fourchus d'une même série aboutit à un barillet cloisonné en deux compartiments suivant un plan vertical. L'eau descend par une travée,

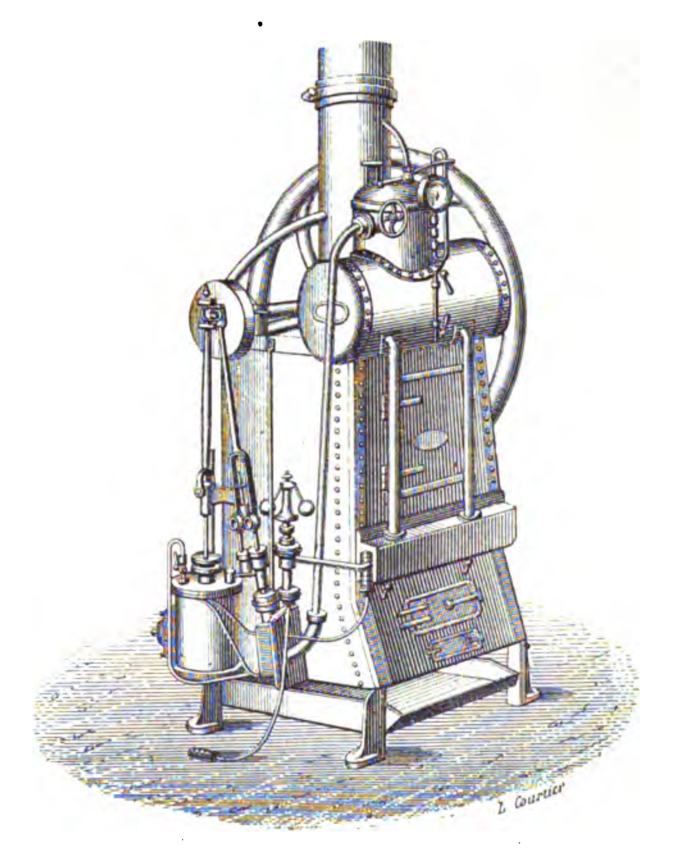


Fig. 642. — Chaudière Du Temple (vue perspective).

la vapeur remonte par l'autre. Ces barillets sont fermés par le bas et suspendus au réservoir.

1048 — Dans la *chaudière Terme* et *Deharbe* (1), le dégagement

(1) *Revue industrielle*, 23 mars 1889, p. 113. — *Revue technique de l'Exposition de 1889*, 6e partie, t. I, p. 217. — *Bulletin de la Société d'encouragement*, 4e série, t. III, p. 161. — Ser. *Physique industrielle*, t. II, p. 104.

n'a également lieu que d'un seul côté (fig. 639, 640, 641). Les tubes se répartissent en groupes de trois, dont deux sont inclinés dans un sens, et le troisième en sens contraire. A l'extrémité libre, on les relie entre eux à l'aide de boîtes superposées. De l'autre côté, ils débouchent dans un collecteur vertical.

1049 — La *chaudière Maniquet* (¹) présente pour les gaz deux

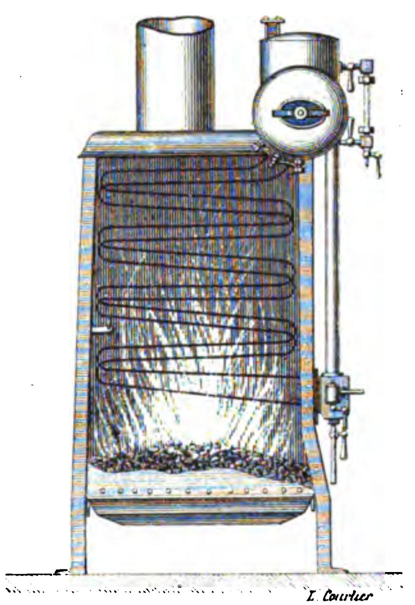


Fig. 643. — Chaudière Du Temple (coupe verticale).

parcours, séparés par une cloison. L'une des travées comprend de gros tubes d'eau, dont chacun se partage en quatre autres plus petits en passant dans la seconde partie. On arrive ainsi à mieux compléter le refroidissement des gaz.

1050 — Avec la *chaudière Du Temple* (²), ainsi que dans celle

(¹) *Bulletin technologique de la Société des anciens Élèves des Écoles d'arts et métiers*, mars 1888, p. 422.

(²) *Génie civil*, t. II, p. 405. — *Le Constructeur*, 22 juillet 1888. — *La Nature*, 16 septembre 1882, p. 244. — *Moniteur industriel*, 23 août 1888, p. 265. — Bienaymé. *Traité des machines marines*, p. 441. — Ser. *Physique industrielle*, t. II, p. 81.

de *Thornycroft* (¹) qui en est dérivée, les tubes deviennent sinueux (fig. 642, 643, 644). La surface de chauffe est formée d'un assez grand nombre d'éléments, composés chacun de deux canaux d'acier de 13 millimètres, disposés en courbe serpentante, et symétriques l'un de l'autre. Ils font communiquer un réservoir supérieur avec

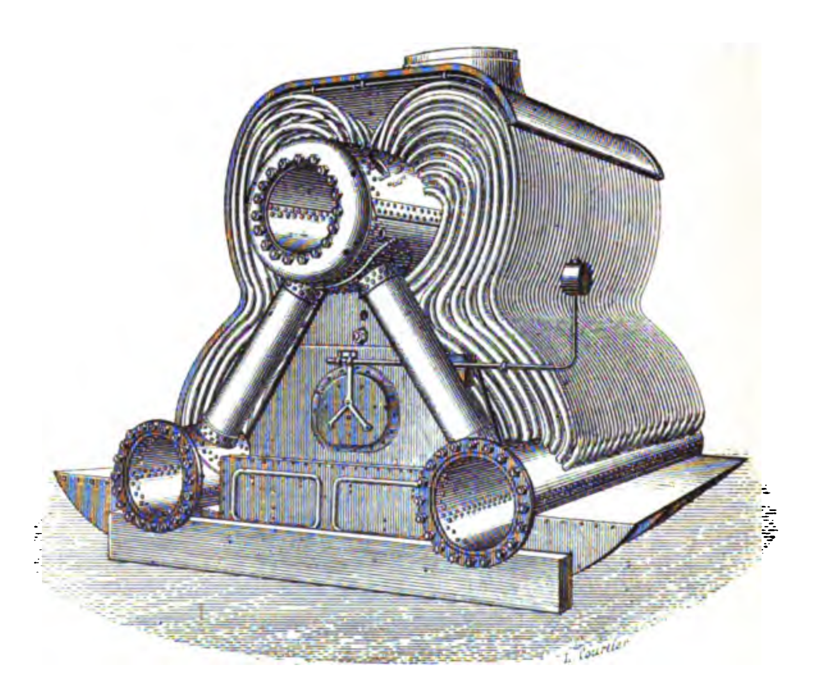


Fig. 644. — Chaudière Thornycroft (vue perspective).

deux distributeurs d'eau d'alimentation placés en contre-bas, et reliés d'autre part directement à ce réservoir par deux tuyaux de retour, de manière à compléter le circuit. La prise de vapeur se fait dans un dôme qui surmonte le réservoir. L'enveloppe métallique du générateur est garnie à l'intérieur d'un revêtement en briques réfractaires.

(¹) *Génie civil*, t. XV, p. 238. — *Revue industrielle*, 3 novembre 1888, p. 434. — *Engineering*, 18 mai 1883, p. 463; 26 avril 1889, p. 402. — *Proceedings of the Institution of Civil engineers*, 1889, p. 90. — *Scientific American supplement*, 18 juin 1883. p. 11-194.

§ 4

CHAUDIÈRES A SERPENTIN

1051 — *Chaudière Belleville.* — La chaudière à serpentin, dont

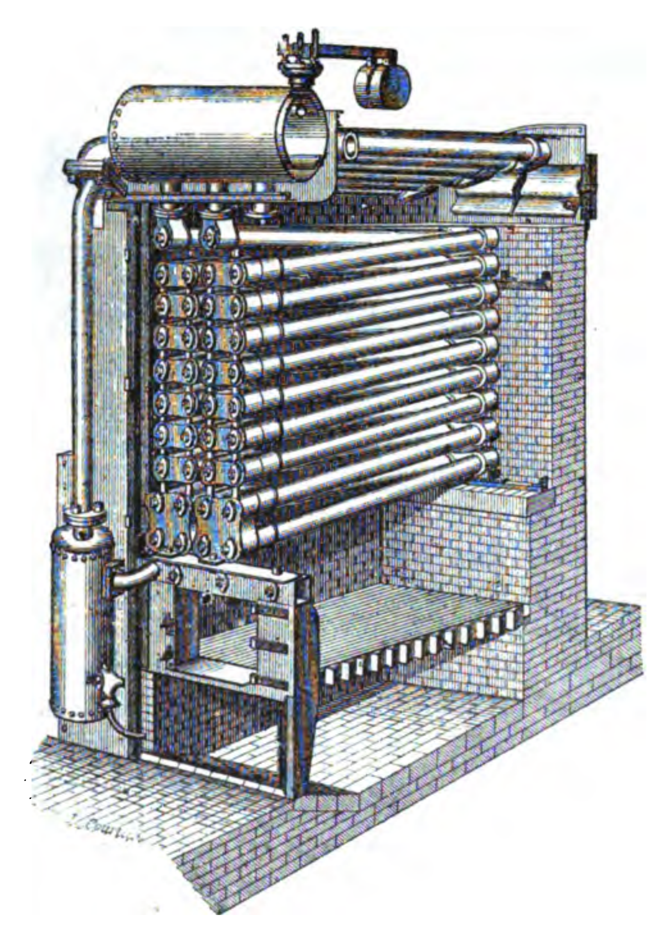


Fig. 645. — Chaudière Belleville (vue perspective.)

le type le plus parfait est le générateur Belleville ([1]), représente un

([1]) Delaunay. *Étude sur les générateurs à haute pression*, in-8°, 1878. -- Olry. Les

pas décisif dans la voie de la réduction du volume liquide, et par suite du danger (fig. 645, 646, 647). Le réservoir d'eau, que nous trouvons dans tous les appareils précédents, disparaît définitivement, et le faisceau tubulé reste seul pour contenir le liquide.

Une seconde différence essentielle consiste dans la disposition de ce faisceau lui-même. Comme dans le cas précédent, il recouvre en projection la grille, légèrement inclinée vers l'arrière, et il présente encore la disposition sectionnelle qui le partage en séries complètement distinctes les unes des autres. Mais, dans chacune de ces

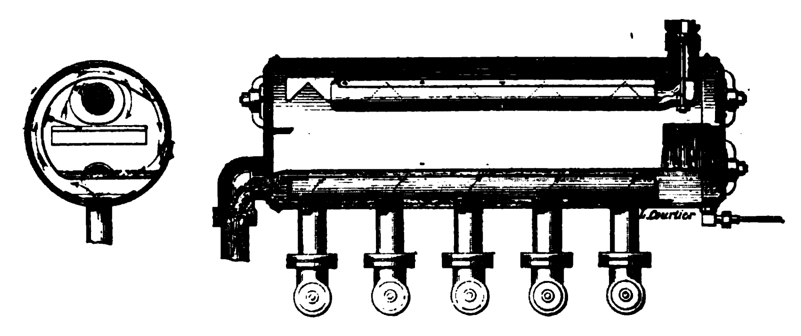


Fig. 646 et 647. — Collecteur-épurateur d'alimentation Belleville. (Coupes transversale et longitudinale).

dernières, les tubes ont perdu leur indépendance. Ils sont maintenant assemblés bout à bout en forme de *serpentin*, que l'eau parcourt d'un bout à l'autre. Ces diverses séries reposent par un de leurs angles sur le *collecteur d'alimentation* qui leur répartit le liquide, et par l'autre extrémité sur un seuil en maçonnerie.

Les tubes en fer qui constituent une série sont compris dans deux plans verticaux contigus séparés par quelques centimètres. Ils présentent une pente constante de 5 centimètres par mètre. Le dia-

chaudières à petits éléments. *Congrès international de mécanique appliquée de* 1889, p. 16. — Générateurs Belleville. *Guide pour la conduite et l'entretien des générateurs auxiliaires alimentés à l'eau de mer*, in-8°. — *Portefeuille économique des machines*, 3ᵉ série, t. VIII, p. 66. — *Bulletin de la Société de l'industrie minérale de Saint-Étienne*, 2ᵉ série, t. XI, p. 901. — *Revue technique de l'Exposition de* 1889, 6ᵉ partie, t. I, p. 84. — *Les Mondes*, t. XXXVII, p. 202. — Sauvage. *Annales des mines*, 1890, p. 581. — Hirsch et Debize. *Leçons sur les machines à vapeur*, t. I, p. 608. — Ser. *Physique industrielle*, t. II, p. 76.

mètre ne dépasse pas 125 millimètres, avec une épaisseur de 5 millimètres, portée à 7 dans le voisinage du foyer.

De l'une des deux rangées à l'autre, les tubes sont réunis par des boites horizontales en fonte malléable, avec des joints à vis, assujettis à l'aide de manchons et de contre-bagues. On y ménage, en regard des tubes, des ouvertures munies de bouchons à garniture d'amiante, pour permettre le nettoyage intérieur. Ces boites reposent les unes sur les autres, avec interposition de cales.

Pour les communications verticales, on a soin d'environner d'une tubulure l'orifice de passage. Elle s'élève à une certaine hauteur à travers le liquide, afin que l'entartrement puisse se déposer au pied de cette saillie sans oblitérer la section offerte au courant. La jonction finale avec le réchauffeur supérieur, dont nous allons maintenant parler, se fait par un raccordement à joint conique et bride boulonnée pour permettre les dilatations.

1052 — L'alimentation s'effectue dans un récipient supérieur qui porte le nom de *réchauffeur*, et qu'il ne faut pas confondre avec le réservoir d'eau des modèles précédents, bien qu'il les rappelle par son aspect. Comme ce dernier, il est relié directement à l'aide d'un tuyau avec le *collecteur d'alimentation* situé à la base des serpentins, et destiné à leur distribuer l'eau. Avant de s'engager de là dans les tubes, le liquide se calme assez pour que les troubles se déposent dans un *déjecteur*, d'où on les expulse périodiquement à l'aide d'un purgeur.

Ainsi que l'ancien réservoir, le nouveau récipient est destiné à l'échauffement préalable de l'eau d'alimentation, en vue de provoquer la précipitation d'une partie des sels. A cet effet, le liquide lancé par la pompe d'alimentation contre une paroi s'y pulvérise devant le débouché de la vapeur qui sort des serpentins.

Toutefois ce vase ne renferme plus, comme dans les cas précédents, un bain liquide, présentant un niveau bien déterminé. Ce niveau se trouve maintenant dans le faisceau tubulé, vers le milieu de sa hauteur; mais il n'y existe que d'une manière assez vague. En effet l'eau, en s'élevant dans les serpentins, y subit l'action calorifique; elle devient mousseuse en raison du dégagement de plus

en plus abondant de vapeur, et finit par passer à l'état gazeux, sous lequel elle rentre dans le réchauffeur supérieur. La pente constante des tubes facilite ce dégagement, en prévenant la formation de chambres de vapeur. Elle contribue en même temps à ramener vers le bas l'eau qui aurait été entraînée trop haut par les soubresauts de l'ébullition.

Une fois parvenu dans le réchauffeur, le mélange s'y épure. Des chicanes le forcent à infléchir ses trajectoires, en s'essorant par l'influence des forces centrifuges (fig. 643). Le liquide, en raison de sa grande densité, s'applique contre les parois, redescend sur le fond du cylindre, et de là dans le bas avec l'eau d'injection. La vapeur se concentre vers l'axe. Un *tube diviseur* l'y puise à travers des trous de faible diamètre, et la conduit finalement à un *sécheur*, formé de tubes qui sont disposés au ciel du foyer.

1053 — Un tel fonctionnement est très délicat. Toutes les circonstances en ont été étudiées avec persévérance par l'inventeur pendant plus de quarante années d'incessants perfectionnements. Divers appareils sont encore annexés à ce bel ensemble pour obvier aux principales difficultés.

Nous avons expliqué que le plan d'eau est peu saisissable dans ce régime tumultueux. Cependant la réglementation publique exige que le niveau soit mis en évidence, et la conduite pratique du générateur ne saurait d'ailleurs se passer de ce renseignement. Dans ce but, on met l'intérieur en communication avec une tubulure latérale, où le calme s'établit en donnant naissance à un niveau liquide plus explicite.

Pour en assurer la constance, on n'a plus ici le secours du réservoir d'eau, qui a été supprimé. La sollicitude la plus vigilante du chauffeur n'y saurait suffire, et un appareil automatique devient nécessaire. Ce *régulateur d'alimentation* (n° 1125) consiste en un flotteur métallique, supporté par le bain dont il vient d'être question. Un jeu de leviers transmet ses variations de niveau à la soupape équilibrée qui règle l'arrivée de l'eau.

Pour éviter les conséquences d'un abaissement de niveau, s'il vient à se produire malgré ces précautions, on adapte aux points les

plus critiques de la chaudière des *chevilles en métal fusible* (n° 1225).

La tension de la vapeur est gouvernée de son côté par un *régulateur de pression* (n° 1077). Elle exerce directement sa poussée sur un ensemble élastique constitué par une pile de *rondelles Belleville*, sorte de soufflets métalliques formés de cônes très aplatis, réunis deux à deux, base contre base, et susceptibles de céder plus ou moins sous l'effort. Leur déformation est utilisée pour manœuvrer un registre, qui agit sur le tirage.

La mise en pression initiale est rapide, et sa durée ne dépasse pas 15 à 20 minutes. En allure normale, il est bon que la tension reste plus élevée de 1 ou 2 kilogrammes que dans la machine, afin de parer aux inégalités du régime de la chaudière. Un *détendeur* spécial (n° 1104) la ramène au degré constant qui est nécessaire pour la bonne marche du moteur.

1054 — *Chaudière Serpollet.* — La chaudière Serpollet [1] constitue le dernier mot de l'inexplosibilité, attendu qu'elle ne renferme à chaque instant qu'une quantité d'énergie en quelque sorte inappréciable [2]. Pour ce motif, son emploi est limité à des applications qui ne réclament que de très petites puissances [3]. En vue de la renforcer jusqu'au chiffre de quelques chevaux, l'on associe plusieurs générateurs identiques, dont l'ensemble constitue une chaudière sectionnelle (fig. 648).

Chacun de ses éléments est un générateur à serpentin. Le liquide

[1] G. Richard. Les moteurs secondaires à l'Exposition de 1889. *Revue technique de l'Exposition de* 1889, 6e partie, t. I, p. 427, 535. — *Génie civil*, t. XIII, p. 271, 283 — *Revue industrielle*, 9 novembre 1889, 25 avril 1891, p. 161. — *La Lumière électrique*, t. XXX, p. 263. — *Compte rendu mensuel des séances de la Société de l'industrie minérale de Saint-Étienne*, 1888, p. 220. — Olry. Les chaudières à petits éléments. *Congrès de mécanique appliquée de* 1889, t. III, p. 27. — Lesourd. *Ibidem*, p. 116. — *Portefeuille économique des machines*, décembre 1888. — *La Nature*, 10 août 1889, 3 janvier 1891. — Hirsch et Debize. *Leçons sur les machines à vapeur*, t. I, p. 1012. — Ser. *Physique industrielle*, t. II, p. 74. — Haton de la Goupillière. *Revue des travaux scientifiques*, t. VIII, p. 423. — *Engineering*, 14 août 1891, p. 195; 18 septembre 1891, p. 331. — *The Engineer*, 10 juillet et 25 septembre 1891.

[2] En conséquence, elle a été dispensée des appareils de sûreté par une décision ministérielle du 24 octobre 1888, à l'exception d'une soupape qui doit se trouver sur le tuyau de refoulement de la pompe alimentaire.

[3] Phaéton à vapeur Serpollet, tricycles, machines à coudre, etc.

parcourt d'un bout à l'autre un tube enroulé en spirale. Cette forme a pour but de ramasser sous un plus petit volume l'ensemble du système. Les flammes montent dans le centre des spires superposées, redescendent par l'extérieur, et s'échappent aux quatre angles.

Pour construire l'un de ces éléments, on prend un tube en acier doux, en cuivre, ou en laiton, et on l'aplatit au laminoir de manière à réduire sa section à une hauteur de $\frac{1}{10}$ à $\frac{3}{10}$ de millimètre, sur une largeur de 45 millimètres. En cet état, les tubes sont essayés à la pression hydraulique de 100 kilogrammes.

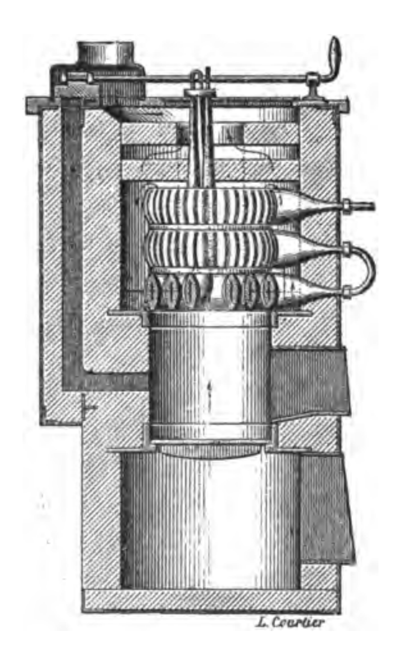


Fig. 648. — Chaudière Serpollet. (Coupe verticale).

L'eau d'alimentation est injectée à un bout de la spirale, à l'aide d'une pompe de compression mue par la machine. L'autre extrémité est ouverte librement du côté du moteur. Il n'y a pas de valve d'arrêt. Pour stopper, il suffit d'arrêter la pompe. La provision de vapeur se trouve épuisée à l'instant même. En vue d'éviter les coups de feu pendant les arrêts, un orifice spécial fait communiquer directement l'arrière du foyer avec la cheminée. Quand on veut remettre en train, on donne quelques coups de pompe à la main.

Ce mode de fonctionnement présente un côté paradoxal, et l'on est porté à redouter un entartrement presque immédiat. Mais la rapidité du courant est telle, en raison de l'exiguïté de sa section, que rien ne saurait s'y arrêter. Les résidus sont rejetés dans la machine, où ils jouent, dit-on, le rôle de lubrifiant, en raison de leur extrême division. L'inventeur a toutefois prévu la possibilité d'une obstruction, et un *robinet inverseur* permet en pareil cas de

faire passer le courant en sens contraire, de manière à solliciter les particules à ressortir par où elles sont arrivées.

On ne saurait évidemment attendre d'un système placé dans des conditions aussi exceptionnelles, un rendement bien économique. On annonce une consommation de 4 kilogrammes de charbon par cheval-heure. Mais dans de semblables conditions, cette considération perd évidemment son importance.

1055 — *Batteries de générateurs.* — Nous venons de suivre pas à pas la décroissance progressive de la quantité d'eau enfermée dans le générateur, depuis les massives chaudières à corps cylindrique unique jusqu'au volume insignifiant de l'appareil Serpollet. La surface de chauffe rapportée au mètre cube d'eau est en général de 5 à 6 mètres pour la première, de 13 à 25 avec le système tubulaire, de 50 ou même plus dans les chaudières tubulées.

En ce qui concerne le prix de revient, ce dernier système revient à peu près au même que le type tubulaire, mais il est moins économique que la chaudière ordinaire à bouilleurs. A la vérité, cette différence se trouve rachetée par de nombreux avantages qui ont été énumérés plus haut (n° 1041).

Sous le rapport de l'emplacement, on a cité les chiffres suivants [1], qui expriment le rapport de la surface de chauffe effective à la superficie horizontale occupée par l'ensemble de l'appareil :

Chaudières à grand volume	. . . . . .	2 à 3,
— semi-tubulaires	. . . . . .	3 à 5,
— tubulaires	. . . .	5 à 9,
— tubulées	. . . .	9 à 12,
— verticales	. . . .	10 à 15.

1056 — Il arrive fréquemment que le total de la puissance qu'il s'agit de réaliser ne permettrait pas de le demander à un seul générateur, dont les dimensions et le fonctionnement deviendraient tout à fait irréalisables. On constitue alors une *batterie de chaudières* (fig. 649, 650).

[1] Ser. *Physique industrielle*, t. II, p. 126

L'alimentation se fait dans ce cas à l'aide d'un engin commun et d'un collecteur général, sur lequel se brancheront les divers générateurs, avec les organes de sûreté dont nous parlerons plus tard (n° 1194).

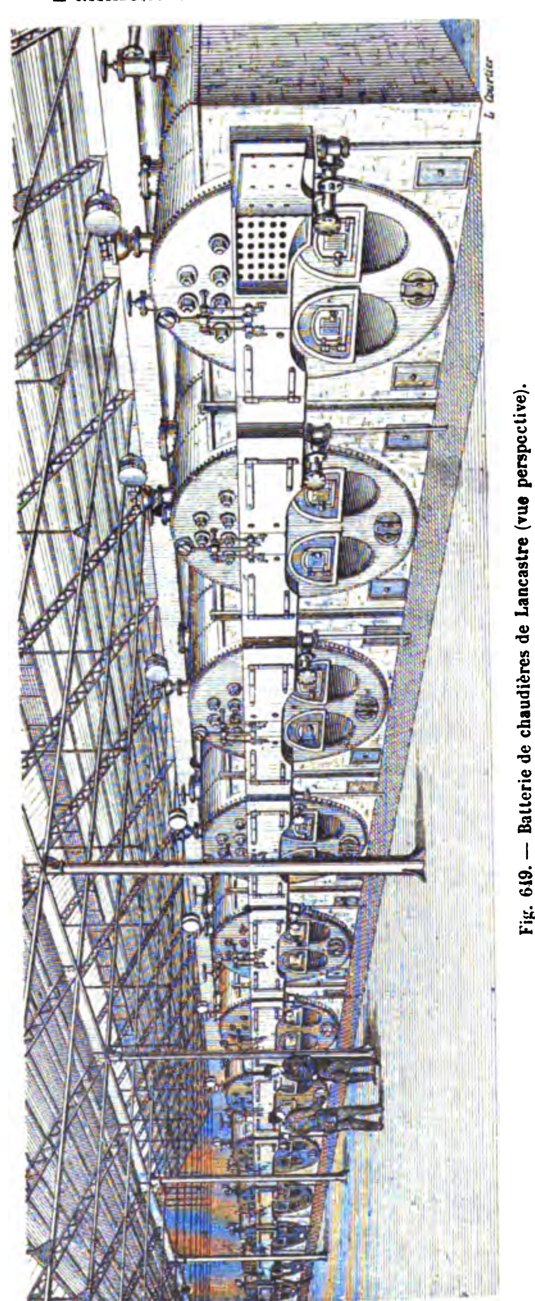


Fig. 619. — Batterie de chaudières de Lancastre (vue perspective).

De même toutes les prises de vapeur se déversent dans un collecteur commun, où le fluide se sèche, en raison de la grande section que l'on donne à dessein à cette conduite [1]. Des purgeurs servent à la débarrasser de l'eau déposée ou condensée. Les branchements doivent présenter des *cols de cygne* destinés à faciliter la dilatation [2]. Cette canalisation est disposée au-dessus des chaudières. La circulation des hommes pour la visite et les réparations s'effectue à l'aide de passerelles munies de garde-corps.

[1] Voy. t. I, p. 500.

[2] Joint à rotule Boutmy pour col de cygne (*Revue industrielle*, 1880, p. 215).

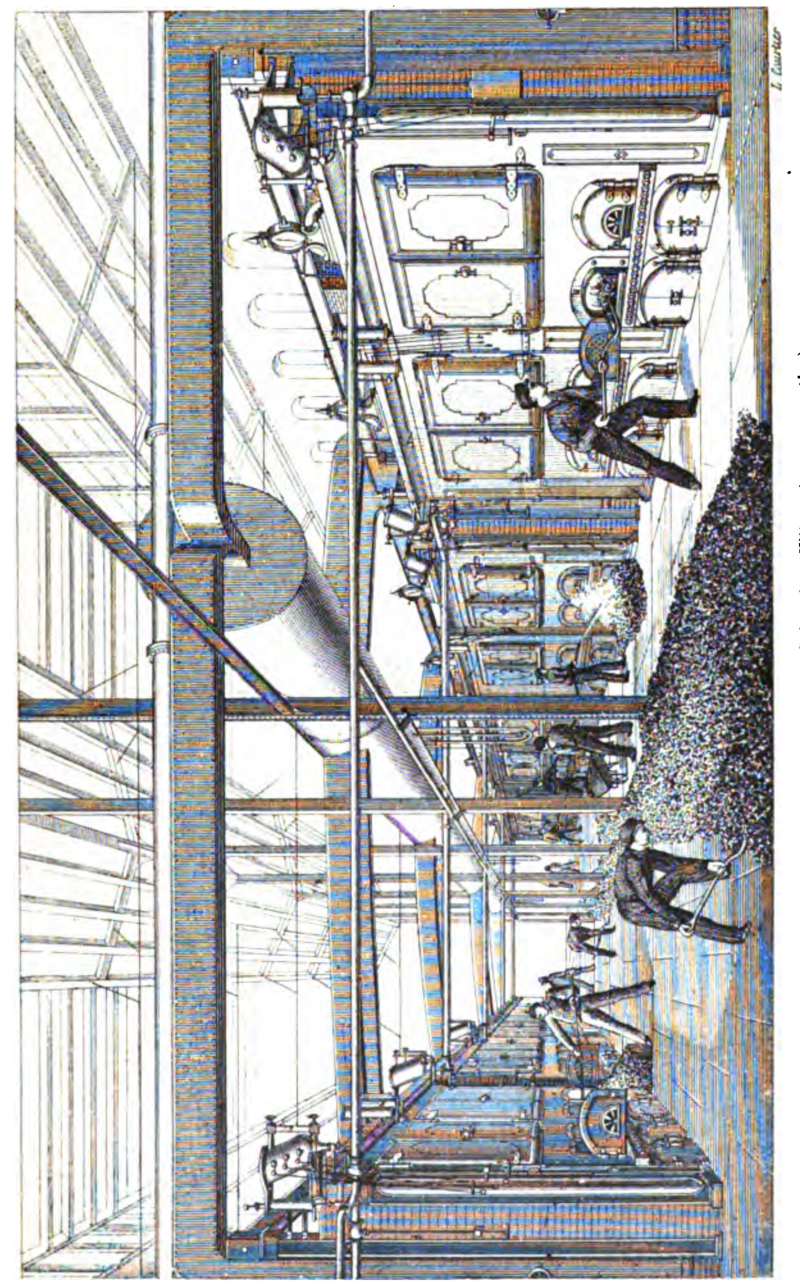


Fig. 650. — Batterie de chaudières Babcock et Wilcox (vue perspective).

Tout cet ensemble est renfermé sous une halle couverte (1). De larges baies facilitent le tirage de l'air par les foyers, et les conditions de la ventilation d'un séjour aussi pénible pour les ouvriers. Leur place de travail, qui prend le nom d'*enfer*, doit être l'objet de la sollicitude des ingénieurs. Il faut qu'elle présente des dimensions suffisantes pour la manœuvre des râbles, ainsi que des issues très faciles pour les divers services, et surtout pour la fuite des hommes en cas d'accident. Les plates-formes, les escaliers, si la chaudière est enterrée (2), doivent être disposés de manière qu'en aucun cas leur accès ne puisse être coupé pour un homme isolé dans quelque partie reculée, et menacé par des torrents de vapeur et d'eau bouillante. Les portes doivent s'ouvrir de dedans en dehors, ou être à simple poussée. Il faut enfin veiller à ce que, dans l'usage, ces passages ne soient jamais encombrés par des dépôts d'outils ou des tas de charbon. Des robinets avec lances d'eau sont mis à la disposition des chauffeurs, pour leur permettre d'éteindre les escarbilles et d'entretenir une propreté suffisante. Le sol est dallé en pierres dures ou en briques placées de champ. Des caniveaux, des égouts sont disposés pour la vidange et les nettoyages.

(1) Les conditions de l'emplacement sont subordonnées aux prescriptions des règlements administratifs (n° 1188).

(2) On ne saurait en pareil cas se contenter d'échelles. Il est bon en outre d'y établir des mains-courantes.

CHAPITRE LVII

CHAUDIÈRES A COMBUSTIBLES SPÉCIAUX

§ 1

CHAUDIÈRES VERTICALES MÉTALLURGIQUES

1057 — Les forges emploient pour l'élaboration du fer et de l'acier un grand nombre de fours à réverbère, dont la conduite est réglée par les nécessités de l'opération. Il en résulte des flammes d'une température très élevée, qui emportent en pure perte une quantité de chaleur considérable. Il était dès lors naturel de chercher à utiliser ce calorique, pour la production de la vapeur motrice qui est nécessaire à ces usines ([1]).

En même temps, l'affinage de la fonte réclame une action oxydante, et par suite la présence d'un grand excès d'oxygène, qui rend ces flammes particulièrement corrosives pour la tôle des chaudières ; d'où la nécessité de précautions exceptionnelles, formant de ces appareils un groupe à part.

([1]) Hanet-Cléry. Étude sur les chaudières verticales chauffées par les flammes perdues des foyers métallurgiques. *Annales des mines*, 7e série, t. XIV, p. 68. — Chaudières métallurgiques. Rapport de la sous-commission d'études. *Ibidem*, 8e série, t. X, p. 482. — Michel-Lévy. Étude et enquête sur les conditions d'installation et de fonctionnement des chaudières de première catégorie chauffées par les flammes perdues des foyers métallurgiques. *Ibidem*, novembre-décembre 1886. — Belleville. *Note sur l'emploi des chaudières pour l'utilisation des chaleurs perdues des fours métallurgiques*, in-8°, 1883. — Trautmann. Rapport sur la catastrophe de Marnaval. *Annales des mines*, 8e série, t. IV, p. 249. — *Note sur l'emploi des chaudières pour l'utilisation des chaleurs perdues des fours, notamment dans l'industrie métallurgique*, in-8°, Paris, Chaix, 1888.

Ajoutons encore que la cherté des terrains tend généralement à provoquer une grande concentration dans la disposition des forges, et que d'ailleurs un motif tout spécial y concourt encore ; à savoir la nécessité de faire parcourir des trajets aussi courts que possible aux loupes chaudes qui vont de chacun des fours aux appareils de cinglage : laminoirs, marteaux ou presses. La question de l'emplacement joue donc un grand rôle dans l'installation de ces chaudières.

On peut à cet égard employer deux dispositifs : horizontal ou vertical. Le premier est assez usité [1], mais au prix d'un grand encombrement.

1058 — Pour ce motif, on a très souvent recours [2] à la disposition verticale [3], qui permet d'installer au-dessus d'une projection horizontale très restreinte, une hauteur, et par suite un volume d'eau pour ainsi dire arbitraires (fig. 651). La longueur du corps cylindrique atteint ordinairement 12 à 15 mètres, et même exceptionnellement 20 mètres. La chaudière est environnée d'une tour en briques qui forme à la fois carneau et cheminée. Un intervalle de 30 à 40 centimètres est pour cela nécessaire. L'ensemble est surmonté par deux ou trois petites cheminées de quelques mètres de haut.

(1) En 1885, un total de 124 établissements métallurgiques, y compris les ateliers de chemins de fer, utilisaient en France 775 chaudières horizontales chauffées par les flammes perdues de 950 fours.

(2) En 1876, il existait en France 840 chaudières métallurgiques verticales, réparties dans 78 établissements.

(3) Chaudières verticales, métallurgiques ou autres : BOUCHÉ et DE LA HARPE. *L'Aéronaute*, septembre 1773, p. 168. — BRESLAY. *Revue industrielle*, 11 avril 1883, p. 149. — BRÉVAL. Laurent et Dunkel. *Album du constructeur de machines à vapeur*, p. 89. — COCHOT. Ser. *Physique industrielle*, t. II, p. 41. — CULVER. *American Machinist*, 16 février 1884, p. 1. — EGROT. Laurent et Dunkel. *Album du constructeur de chaudières à vapeur*, p. 89. — FOUGERAT (*Revue industrielle*, 1881, p. 132. — *Bulletin technologique de la Société des anciens Élèves des Écoles d'arts et métiers*, 1881, p. 45). — GRENIER et CHEVALIER. *Portefeuille économique des machines*, 3e série, t. VIII, p. 146. — HERMANN LA CHAPELLE. Laurent et Dunkel. *Album du constructeur de chaudières à vapeur*, p. 89. — LENOIR et BELBEZET. *La Nature*, 10 décembre 1881, p. 22. — MARINONI. Laurent et Dunkel. *Album du constructeur de chaudières à vapeur*, p. 89. — MEYER (Chabaud. *Bulletin de la Société minérale de Saint-Étienne*, 2e série, t. III, p. 147. — *Engineering*, 22 septembre 1873). — NAPIER. Rankine. *Manuel de la machine à vapeur*. Traduction G. Richard, p. 504. — THODE. *Scientific American*, 12 septembre 1885, p. 162. — TOMSEA. *Revue industrielle*, 13 avril 1881, p. 141. — ZAMBEAUX. Ser. *Physique industrielle*, t. II. p. 59.

Le diamètre des générateurs proprement dits varie entre 1 mètre et $1^m,40$. Un moindre rayon entraverait les nettoyages. Une plus grande largeur exagérerait le rapport du volume d'eau à la surface de chauffe. On calcule ce diamètre de manière à obtenir un mètre carré de section pour 300 ou 400 kilogrammes de charbon passés à l'heure. Une telle disproportion entre les dimensions verticales et horizontales crée une instabilité qui exige des fondations soignées et de solides ancrages.

On adjoint ordinairement au système un foyer ordinaire à grille, afin de pouvoir continuer la production de la vapeur dans les intervalles de chômage ou de réparation des fours. Son rampant doit aboutir latéralement, et non sous le fond de l'enveloppe métallique, pour ne pas y provoquer la calcination des dépôts.

Quelques chaudières verticales sont chauffées à la fois par l'extérieur et par l'intérieur, d'après le type de Cornouailles. Les gaz montent alors par la circonférence et redescendent dans l'axe.

Assez souvent on réunit deux corps de chaudière dans la même enveloppe en maçonnerie.

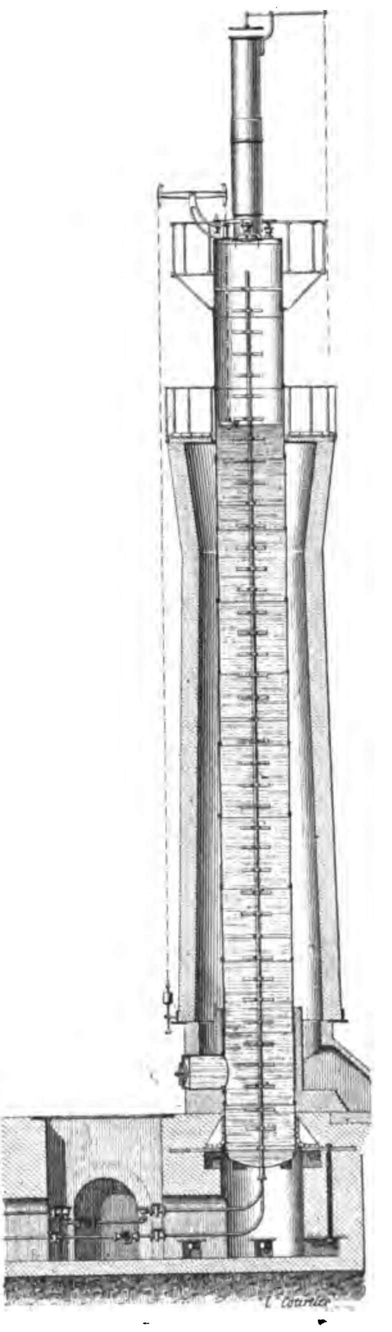


Fig. 651. — Chaudière métallurgique verticale (Coupe verticale).

Si une chaudière est chauffée à la fois par plusieurs fours, leurs divers rampants doivent avoir des registres indépendants. On a parfois, en pareil cas, cloisonné le carneau suivant des plans méridiens, pour assurer l'indépendance de ces fours. Mais cette disposition présente le grave défaut de provoquer, en cas d'inégalités ou de suspension du travail dans les uns ou dans les autres, des dilatations ou des contractions transversales extrêmement nuisibles à la conservation des tôles.

Les appareils de sûreté sont placés à la partie supérieure. Des escaliers des galeries, des passerelles en permettent la visite, ce qui occasionne un grand assujettissement. Nous ferons toutefois plus loin une réserve pour les indicateurs de niveau.

La nature corrosive et la température élevée des gaz a suggéré des précautions spéciales, qui ont reçu la sanction administrative (1). Une murette doit recevoir l'action directe des flammes, afin d'éviter l'effet destructeur des dards de chalumeau. Il faut que sa hauteur soit suffisante pour infléchir à coup sûr le jet. Elle s'élève ordinaire ment à $1^{m},50$ au-dessus de la voûte du rampant. Son développement horizontal atteint un quart de la circonférence. Il est absolument essentiel qu'elle ne se trouve pas au contact du métal (n° 1002). Un intervalle minimum de 5 centimètres est réglementaire, et il est préférable de le pousser à 8 ou 10.

Ce rampant doit aboutir tangentiellement, et non pas normalement à la circonférence. Il est très nécessaire de préserver cette partie de la chaudière, qui, en même temps qu'elle est exposée à la plus lourde charge hydrostatique et à la température la plus élevée, se trouve, à intervalles successifs, refroidie par l'alimentation, ce qui tend à tourmenter les tôles d'une manière destructive. Pour ce même motif, il est préférable d'effectuer l'alimentation aussi haut que possible, et d'une manière continue afin d'éviter les chutes de température.

Nous avons déjà dit (n° 954) que les surfaces de chauffe verticales ont moins d'efficacité que celles qui sont rapprochées d'un plan horizontal. Par compensation, on utilise ici la périphérie entière du

(1) Circulaire ministérielle du 13 février 1884. — Décret du 29 juin 1886.

corps cylindrique, tandis qu'elle n'est échauffée, avec le dispositif horizontal, que jusqu'à la ligne des carneaux. On emploie d'ailleurs un système de chicanes pour ralentir l'ascension trop rapide des gaz, et, en définitive, on calcule l'étendue de la surface de chauffe comme dans les conditions ordinaires (n° 1009), en fonction de la quantité de combustible qui est passée dans les fours.

La surface libre du liquide a peu d'étendue. Le dégagement de la vapeur en est rendu plus difficile. En même temps la partie la plus chaude se trouve à la base; c'est donc sous la plus grande charge hydrostatique que la volatilisation tend à se développer davantage. Il en résulte que l'eau devient mousseuse et l'ébullition tumultueuse. Le primage s'en trouve augmenté. Pour y remédier autant que possible, on fait redescendre la vapeur à travers un tuyau vertical au sein de la masse d'eau, afin d'obtenir un séchage approximatif.

L'abaissement du plan d'eau, en cas de défaut d'alimentation, devient plus rapide, en raison de l'exiguïté de la section droite.

L'attention doit donc être particulièrement en éveil à cet égard. Aussi est-il nécessaire (n° 1203) de transmettre à la base de la chaudière, et sous les yeux du surveillant, l'indication du niveau de l'eau.

Pour le même motif, le carneau doit s'arrêter à une distance notable au-dessous de la chambre de vapeur.

L'irrégularité du régime oblige à donner à cette chambre un volume suffisant pour parer aux chutes de pression qui pourraient s'y produire sous les appels du piston.

En cas d'explosion, la tendance aux projections pouvant être considérée comme normale à la surface, les débris se trouveront lancés horizontalement, et d'un point élevé, ce qui étendra beaucoup la zone dangereuse. L'intensité des ravages est alors aggravée par l'énorme provision d'eau renfermée dans l'appareil, et par la chance de voir disloquer et bouleverser le four métallurgique lui-même, avec le bain métallique incandescent qu'il renferme. Il ne faut pas non plus perdre de vue que les forges sont toujours le séjour d'une nombreuse agglomération d'ouvriers. On devra donc s'attacher, tout en laissant, comme c'est inévitable, les généra-

teurs au voisinage immédiat des fours, à les établir, s'il est possible, hors de l'atelier.

Le danger est incomparablement plus grand pour les chaudières métallurgiques verticales qu'avec celles du type horizontal. De 1878 à 1885, celles-ci n'ont occasionné en France que 3 décès et 15 blessures, tandis que l'on trouve pour les premières 59 tués et 103 blessés. Si on les compare à la moyenne générale, on rencontre, de 1878 à 1883, un total de 37 morts et 70 blessures, tandis que l'ensemble, pour tout le territoire, est de 197 tués et 205 blessés. Or, les chaudières métallurgiques verticales ne représentent que le centième environ du total des générateurs relatif à la France entière.

§ 2

CHAUDIÈRES A GAZOGÈNE

1059 — *Chaudières à gaz.* — Les générateurs à gazogène [1] ne doivent pas être confondus avec les chaudières métallurgiques qui viennent de nous occuper. Dans ces dernières, on se voit obligé d'accepter avec ses défauts un mélange *brûlé* incandescent, qui a été constitué en vue d'une opération antérieure toute différente, et dont on entreprend actuellement de soutirer le calorique pour le faire passer dans l'eau, en amenant celle-ci à l'état de vapeur.

Pour conserver les avantages de ce mode de fonctionnement en évitant ses inconvénients, on a eu l'idée de fabriquer tout exprès un gaz *combustible*, et de le brûler ultérieurement sous le générateur. L'appareil qui sert à constituer ce gaz s'appelle *gazogène*, et le récipient ainsi chauffé : *chaudière à gaz* [2].

(1) Chaudières à gaz. *Iron*, 18 juin 1880, p. 440. — Delaunay. *Étude sur les générateurs à haute pression*, in-8°, 1878, p. 24. — Sauvage. *Annales des mines*, novembre-décembre 1890, p. 554. — Ser. *Physique industrielle*, t. I, p. 460. — Pütsch. *Ueber Gasfeuerungen*, Berlin, in-8°, 1881.

(2) Chaudières à gaz : Albin. *Chronique industrielle*, 4 avril 1886, p. 158. — Beaufumé. Ser. *Physique industrielle*, t. I, p. 470. — Belou. Armengaud. *Publication industrielle*, 20e volume. — Grobe. *Revue industrielle*, 3 novembre 1880, p. 435. — Haupt. *Ibidem*, 3 mars 1880, p. 81. — Jones. *Journal des usines à gaz*, 1891, p. 231. — Jucker. *Revue industrielle*, 3 novembre 1880, p. 435. — Minary. *Ibidem*. — Pascal. Armengaud. *Pu*

On a même utilisé dans ce but, sur quelques points du globe où la chose est possible, le *gaz naturel* (¹) que fournissent certains puits forés dans les districts pétrolifères (²).

1060 — Le gaz arrive sous le générateur en même temps que l'air, qui a été préalablement échauffé par son passage dans un récupérateur soumis à l'action des gaz chauds avant leur entrée dans la cheminée. Deux conduites parallèles distribuent l'un et l'autre de ces deux fluides dans un certain nombre de brûleurs alignés sous le corps cylindrique. Une petite voûte réfractaire recouvre chacun de ces derniers, pour recevoir l'action directe du dard de chalumeau, qui serait destructeur pour la tôle en l'attaquant toujours au même point.

On supprime ainsi la diversité des phases de la combustion qui caractérise le mode ordinaire, et l'on réalise une répartition plus égale de la chaleur sur toute la longueur du générateur. La dilatation devient plus uniforme. La fumivorité est complète.

Ces appareils présentent en revanche certains inconvénients. La conduite du foyer n'est plus aussi docile. On ne peut pas, à un moment donné, pousser le feu avec la même facilité. La détérioration est rapide. Des rentrées d'air à travers les maçonneries risquent de provoquer la formation de mélanges détonants. Enfin le système perd tous ses avantages s'il est appliqué à un service quotidien et intermittent. Il lui faut le feu continu.

1061 — *Gazogène Siemens.* — Comme exemple de gazogène, nous décrirons d'abord celui de Siemens (³).

Le combustible est chargé par la trémie A (fig. 652), et descend progressivement sur le plan incliné B. On facilite son mouvement

blication industrielle, 20ᵉ vol. — Ponsard (*Les Mondes*, t. XXXI, p. 736; XXXVI, 480. — *The Engineer*, 1874, p. 66). — Price. *Revue industrielle*, 3 novembre 1880, p. 435

(¹) Chauffage des chaudières par le gaz naturel à Pittsburg (*Chronique industrielle*, 1888, p. 342. — *Portefeuille économique des machines*, 3ᵉ série, t. XII, p. 46. — *La Nature*, 22 mai 1886, p. 395. — *Scientific American*, 27 février 1886, p. 127).

(²) Haton de la Goupillière. *Cours d'exploitation des mines*, t. I, p. 136.

(³) *Chronique industrielle*, 13 février 1887, p. 78. — Ser. *Physique industrielle*, t. I, p. 471. — *Scientific American, supplement*, 29 août 1885, p. 8040. — Siemens. *Heizverfahren mit freier Flammen Entfaltung*, 1885, Berlin.

en ringardant à travers l'orifice C. Sur ce parcours, la houille distille. Les gaz sont appelés par le tirage de la cheminée D. Peu à peu réduite en coke, la charge atteint la grille à gradins E (n° 1092). L'air en traverse les diverses plates-formes, et en filtrant à travers cet excès de charbon, il se convertit en oxyde de carbone, qui prend la même direction que les hydrogènes carbonés. Comme on répand ordinairement de l'eau sur la sole du cendrier, elle donne de son côté une certaine quantité de vapeur, qui se dissocie au contact de la masse embrasée, en formant de l'hydrogène libre et de l'oxyde de carbone. Un registre G sert à régler le tirage. Un regard H permet de surveiller la marche de la réaction.

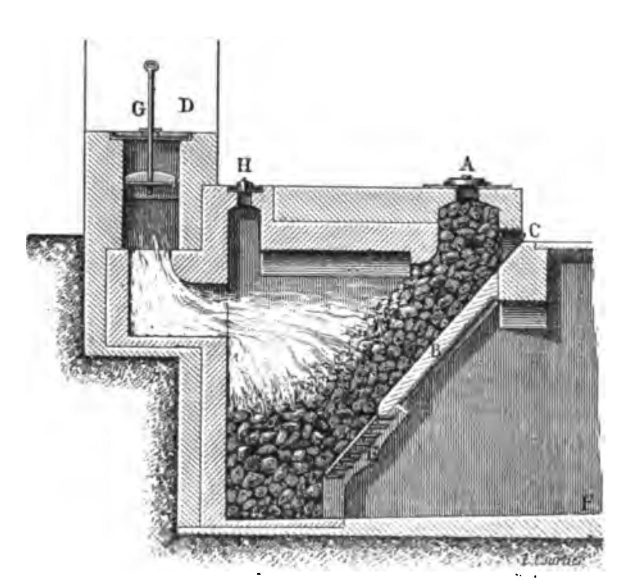


Fig.652. — Gazogène Siemens (coupe verticale).

L'analyse du gaz produit dans l'un de ces appareils a donné *en volume* les résultats suivants :

Partie combustible.	Oxyde de carbone . . .	23,7	33,9
	Hydrogène.	8,0	
	Carbures d'hydrogène .	2,2	
Partie étrangère. .	Acide carbonique . . .	4,1	66,0
	Oxygène.	0,4	
	Azote	61,5	
			99,9

Les éléments combustibles de toute nature forment, comme on le voit, un tiers du volume total.

L'allure est lente. Le décrassage est difficile. La température reste voisine de 600 degrés. Si on la laissait fléchir, l'oxyde de carbone passerait prématurément à l'état d'acide carbonique, et la chaleur dégagée par cette réaction ne servirait, tout au plus, qu'à augmenter le tirage, au lieu d'être recueillie par le générateur et employée pour la vaporisation.

1062 — *Gazogène Muller et Fichet.* — L'appareil de MM. Muller et Fichet (¹) a été combiné pour opérer du même coup et méthodi-

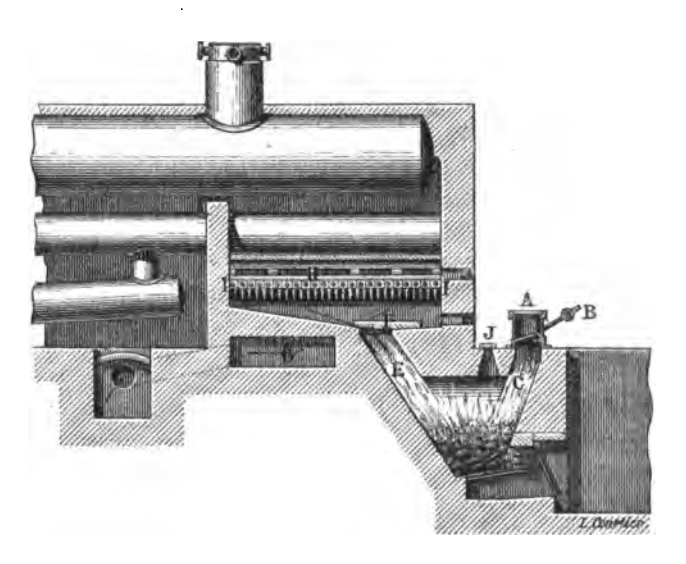


Fig. 653. — Gazogène Muller et Fichet (coupe verticale).

quement la gazéification de la houille et la combustion des produits sous le générateur.

Le combustible est chargé d'heure en heure à travers une trémie A (fig. 653), que l'on maintient fermée en temps ordinaire à l'aide d'un registre B. Un joint de sable s'oppose aux rentrées

(¹) *Mémoires de la Société des Ingénieurs civils*, 1874, p. 670. — Hirsch. *Rapport sur l'Exposition de* 1878, p. 158. — Hirsch et Debize. *Leçons sur les machines à vapeur*, t. I, p. 446. — Ser. *Physique industrielle*, t. I, p. 479.

d'air et aux fuites de gaz. Le charbon descend lentement sur le plan incliné C sans se brûler, en raison de la faiblesse de la température qui règne dans cette région et de l'absence d'air. Il distille progressivement. La combustion se développe en D, et fournit de l'oxyde de carbone en raison de l'insuffisance de l'afflux de l'air, que l'on oblige à passer entre les deux faces de la porte du foyer, afin qu'il la rafraîchisse en s'échauffant pour son propre compte. Le mélange gazeux remonte par le conduit E. Une dalle réfractaire F sert de registre pour en régler l'écoulement. Le courant d'air, que l'on a forcé de circuler à travers des canaux tels que G de manière à s'échauffer dans les massifs, vient déterminer la combustion définitive du fluide dans la chambre H. En vue de la faciliter, on tamise celui-ci à travers une grille réfractaire I. Le regard J permet de surveiller l'opération. On obtient par là un échauffement rapide et une fumivorité très satisfaisante, ainsi qu'une certaine économie, sous la condition d'opérer d'une manière continue.

1063 — *Foyer fermé Du Fay.* — Depuis longtemps on a cherché [1] à réaliser une certaine amélioration du coefficient d'utilisation thermique ε_1 [2], en enfermant complètement la combustion dans l'intérieur de l'appareil, et faisant passer tous ses produits indistinctement à travers le cylindre moteur. Un principe aussi étranger aux conditions ordinaires fait immédiatement surgir toutes sortes de difficultés, que l'on est arrivé à surmonter d'une manière plus ou moins heureuse. Je prendrai comme exemple le foyer fermé qui a été imaginé par M. Du Fay, ingénieur de la marine [3].

Le combustible brûle sur une grille A (fig. 654). En B, une soufflerie mécanique injecte une certaine quantité d'air qui traverse la masse embrasée. Une nouvelle dose est fournie par les tuyères C au-dessus de la grille, en vue de brûler l'oxyde de carbone ainsi formé. Un autoclave D permet de nettoyer de temps en temps le cendrier. Un second autoclave E sert à charger le charbon, qui

(1) Pascal, Belou, Feuillet de Lyon, etc.
(2) Voy. t. I, p. 610.
(3) Armengaud. *Publication industrielle*, t. XX.

tombe directement sur une trappe horizontale F. Quand on a refermé l'orifice, cette trappe s'incline sous l'action d'une manette extérieure, et verse le charbon sur la grille. En G se trouve un pulvérisateur, qui fournit l'eau d'alimentation. Celle-ci, rapidement saisie par la température, se convertit en vapeur, qui se rend au cylindre par l'orifice H, en même temps que les gaz de la combustion.

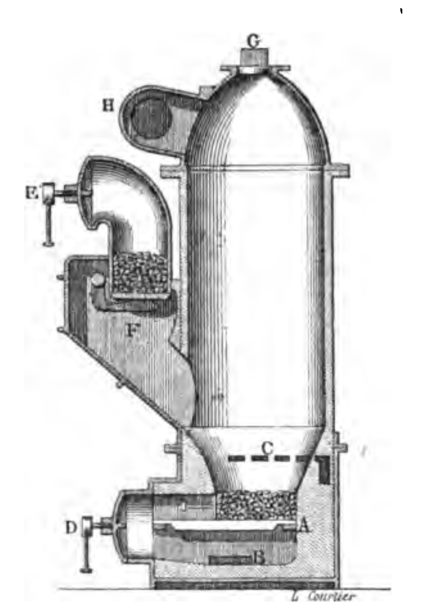


Fig. 654. — Foyer fermé Du Fay. (Coupe verticale).

1064 — Une telle chaudière peut être considérée comme inexplosible, puisqu'elle ne renferme qu'une quantité d'eau insignifiante. Elle constitue un véritable *aéro-vapeur*, avec les avantages et les inconvénients inhérents à cette classe de moteurs [1]. On évite le refroidissement dû à l'ouverture des portes. On arrive facilement, au besoin, à produire de la vapeur surchauffée, en conduisant convenablement le feu.

En revanche, ce système expose à l'encrassement des cylindres, dont les surfaces seront rayées par les escarbilles entraînées. On a soin, pour ce motif, de disposer des chicanes dans le foyer, afin de développer au sein du courant des forces centrifuges qui précipitent les matières solides dans les angles, où elles s'amassent, et d'où on les retire périodiquement. Des gouttières renversées arrêtent les fines, qui ont tendance à grimper le long des parois verticales.

Le foyer est assez difficile à conduire du dehors. On est exposé à la production de coups de feu, ou inversement à l'extinction du foyer, si la pluie du pulvérisateur arrive à prendre le dessus.

[1] Voy. t. I, p. 827

Il est bon d'associer ces appareils par couples, de manière que l'un d'eux serve à entretenir la marche pendant que l'on procède au nettoyage de l'autre.

Une petite soufflerie spéciale sert pour la mise en train, après quoi la soufflerie principale mue par la machine alimente le fonctionnement normal. Nous reviendrons en temps et lieu sur cette question du vent forcé (n° 1095).

§ 3

CHAUDIÈRES A PÉTROLE

1065 — Les essais relatifs à l'utilisation du combustible liquide pour le chauffage des générateurs [1] ont pris beaucoup d'activité dans les pays de production [2]. Un grand nombre de types divers

(1) H. Sainte-Claire Deville, Audouin, Dupuy de Lôme, Urquard, etc.

(2) Dupuy de Lôme. Emploi des huiles minérales au chauffage des chaudières à vapeur. *Annales des mines*, 6e série, t. XV, p. 61. — Foyers de chaudières au pétrole. Ledieu. *Nouvelles machines marines*, t. III, p. 164. — Audenet. Emploi des résidus de pétrole pour le chauffage des générateurs. *Génie civil*, t. VI, p. 346. — Chaudières à pétrole. Richard. *La chaudière locomotive*, p. 715. — Chauffage des locomotives à l'huile de pétrole (*Annales des Ponts et Chaussées*, 1869, 1er sem., p. 414. — *Revue générale des chemins de fer*, octobre 1883. — *Génie civil*, 5 décembre 1886, p. 87). — Chaudières au goudron de houille (*Revue industrielle*, 28 avril 1887, p. 151. — *La Métallurgie*, 6 février 1889, p. 141).

Troost. Emploi des huiles minérales pour le chauffage. *Bulletin de la Société d'encouragement*, 2e série, t. XVI, p. 571. — Debray. Sur l'emploi des huiles lourdes pour le chauffage. *Ibidem*, 2e série, t. XVII, p. 591. — Sur les propriétés physiques et le pouvoir calorifique des pétroles. *Annales des mines*, 7e série, t. I, p. 173. — Audouin. Travail relatif à la combustion des pétroles et des huiles lourdes. *Bulletin de la Société d'encouragement*, 2e série, t. XV, p. 512. — Chassinat. *Chauffage aux huiles lourdes*, in-8°. — Goudron et huiles lourdes. Denfer. *Traité des chaudières à vapeur*, p. 9. — De Maupeou. *Mémorial du Génie maritime*, 1883, 7e livraison. — *Annales industrielles*, 26 avril 1891, p. 540.

Chaudières au pétrole (*American Machinist*, 17 octobre 1889, p. 4. — *Scientific American*, 11 mai 1889, p. 297). — Huile de pétrole dans les locomotives. *Proceedings of the Institution of civil Engineers*, août 1884, p. 300. — Chaudière au pétrole du steamer « Solano ». *American Machinist*, 1er août 1885, p. 2. — Chaudière à pétrole du steamer « Torpedo ». *Engineering*, 10 janvier 1890, p. 30. — Consumption of liquid fuel per ton-mile on compounded locomotives in S. E. Russia. *The Railway Engineer*, août 1891, p. 215. — Brûleurs de pétrole (*American Machinist*, 14 avril 1888, p. 5. — *Scientific American, supplement*, 7 mai 1887, p. 9456 ; 28 janvier 1888, p. 10 063). — *Journal of Franklin Institute*, août 1888.

de foyers [1] ont été proposés dans ce but. J'en indiquerai sommairement les traits principaux (fig. 655).

L'intérieur de la boîte à feu est revêtu de briques réfractaires, afin de pouvoir résister à la température très élevée qui s'y développe, et qui est nécessaire pour la combustion complète. L'huile est amenée par un tuyau, sous l'influence d'une pression hydro-

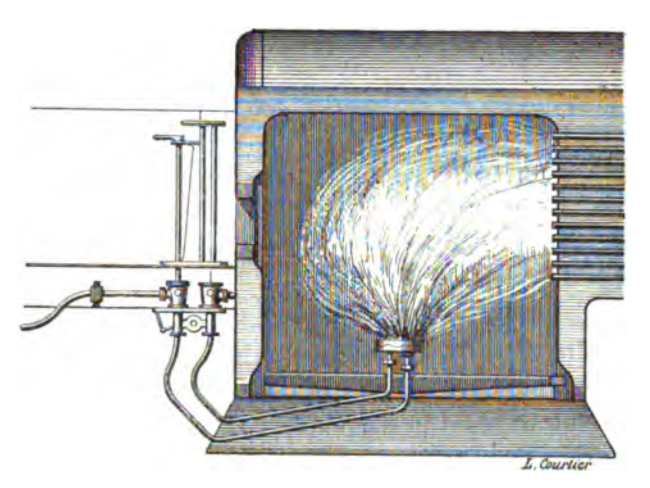


Fig. 655. — Chaudière Brandt à pétrole (coupe verticale).

[1] Chaudières au pétrole : Agnellet. Ser. *Physique industrielle*, t. I, p. 463. — D'Allest (*Génie civil*, t. VIII, p. 7, 19, 36, 67. — *Annales industrielles*, 6 septembre 1885, p. 320. — Soubiran. *Bulletin technologique de la Société des anciens Élèves des Écoles d'arts et métiers*, février 1886, p. 65. — Ser. *Physique industrielle*, t. I, p. 464). — Andow. Ledieu. *Les Nouvelles Machines marines*, t. III, p. 166. — Andreews et Seery. *Scientific American*, 8 février 1890, p. 84. — Aydon (Rankine. *Manuel de la machine à vapeur*. Traduction G. Richard, p. 482. — *The Railroad and Engineering Journal*, t. LXII, p. 265). — Bidle. Ledieu. *Nouvelles Machines marines*, t. III, p. 165. — Bridge Adam. *Ibidem*. — Bullard. *Revue industrielle*, 1er septembre 1888, p. 345. — Burrel. *American Machinist*, 16 juin 1888, p. 5. — Dietrich. *La Nature*, 1er avril 1887, p. 274. — Dupuy de Lôme. Ledieu. *Nouvelles Machines à vapeur*, t. III, p. 166. — Holden (*Revue industrielle*, 19 septembre 1891, p. 377. — *Portefeuille économique des machines*, 3e série, t. XV, p. 106. — *The Engineer*, 15 mai 1891, p. 386. — *The Railway Engineer*, janvier 1891, p. 89). — Linton. Ledieu. *Nouvelles Machines marines*, t. III, p. 166. — Meyer. *Scientific American*, 27 avril 1889, p. 260. — Muller et Fichet. Ser. *Physique industrielle*, t. I, p. 460. — Richardson. Ledieu. *Nouvelles Machines marines*, t. III, p. 165. — H. Sainte-Claire Deville. *Ibidem*, p. 166. — Stewart. *The Railroad and Engineering Journal*, t. LXIV, p. 47. — Treast. *American Machinist*, 13 août 1887, p. 7. — Wife. Ledieu. *Nouvelles Machines marines*, t. III, p. 165.

statique. Un second tube fournit un jet de vapeur ([1]), destiné à entraîner le liquide pulvérisé et mélangé avec l'air. La sole du foyer est formée par une tôle légèrement inclinée vers l'autel.

Pour mettre en train, on emploie une essence facilement inflammable. On doit commencer par ouvrir le jet de vapeur, afin d'éviter la production de mélanges détonants.

1066 — Les avantages que l'on invoque en faveur de ce mode de chauffage sont nombreux. L'opération devient très facile. Un seul homme peut se substituer dans ces conditions à plusieurs chauffeurs. Les feux peuvent même être placés sous le contrôle du mécanicien de quart, qui a les moyens de les régler directement. La charge s'opère d'une manière continue, ce qui supprime les phases variables de la combustion ordinaire. La pression est plus constante, la dilatation plus uniforme. On supprime les ouvertures de portes qui refroidissent la chambre de combustion, ainsi que les décrassages de grilles.

Le combustible possède un pouvoir calorifique exceptionnel, variant aux environs de 10 000 calories. On peut, d'après cela, dans la marine, emmagasiner sous le même poids une plus grande puissance motrice, ce qui augmente la distance qu'il est possible de franchir sans escales. Inversement, en conservant la même limite de distance, on rend disponible une partie du fret. En outre, le poids voulu se loge avec la plus grande facilité dans un volume de forme quelconque, ce qui permet d'utiliser des anfractuosités qui seraient inacceptables pour la houille. La durée du ravitaillement devient très rapide.

Dans des essais faits sur le *Puebla*, Sainte-Claire Deville a obtenu 11 kilogrammes de vapeur, au lieu de 8 que fournissait le coke. La Compagnie des Forges et Chantiers a réalisé dans ses expériences une production de $13^{kg},5$ au lieu de $8^{kg},5$. Nonobstant une telle réduction du poids de combustible, ce procédé de chauffage n'est pas économique, en raison du cours élevé de l'huile. Le prix de revient du

([1]) Sur mer on tend à lui substituer l'air comprimé, afin d'éviter la perte correspondante d'eau distillée.

kilogramme de vapeur reste environ 5 fois plus cher qu'avec les moyens ordinaires.

Cet inconvénient n'est pas le seul, et le danger résultant de l'emploi et de l'emmaganisement à bord d'une pareille quantité de pétrole sert de contrepoids aux avantages du système. Il convient de n'employer que des résidus, de préférence au pétrole brut, et d'écarter dans tous les cas les liquides capables de s'enflammer à une température inférieure à 140 degrés.

§ 4

CHAUDIÈRES A COMBUSTIBLES PAUVRES

1067 — On a essayé d'utiliser, pour le chauffage des générateurs, les combustibles les plus divers, de pouvoirs calorifiques plus ou moins inférieurs.

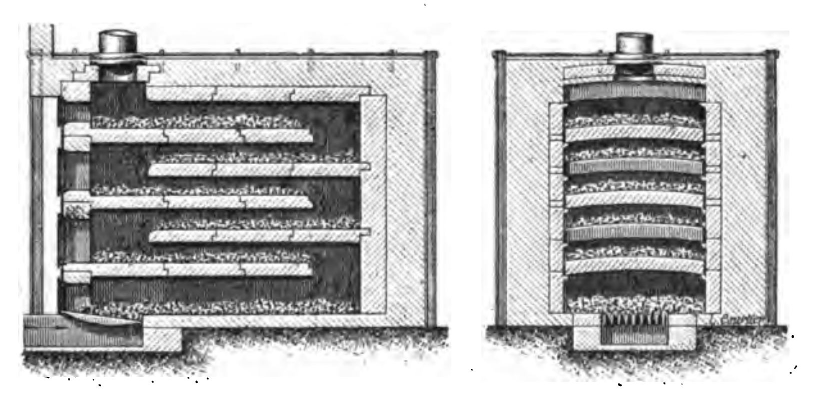


Fig. 656 et 657. — Grille Michel Perret à dalles étagées (coupes longitudinale et transversale).

Je citerai d'abord le poussier de coke (¹). Le coke est exempt de fumée, mais il attaque les grilles et les cuivres.

D'une manière générale, les combustibles pulvérulents exigent

(¹) Chaudière à poussier de coke. *Revue industrielle*, 20 septembre 1890, p. 369. — *Engineering*, 22 septembre 1871, p. 198. — Foyer Hardt pour le charbon fin. *Scientific American*, 5 juin 1880, p. 355.

des systèmes de chauffe spéciaux [1], car ils passeraient à travers des grilles ordinaires. On peut employer en certains cas les grilles à gradins (n° 1092).

L'un des appareils les plus répandus à cet égard est la grille de M. Michel-Perret à dalles perforées [2]. Ces dalles sont légèrement cintrées pour offrir plus de résistance (fig. 656, 657). Des portes servent pour le chargement et l'étalage des menus. L'air circule de bas en haut. On râble successivement le combustible à contre-courant d'étage en étage, de manière à ne retirer à la partie inférieure que des matières épuisées. Une petite grille placée dans cette région sert pour l'allumage, au moment de la mise en train.

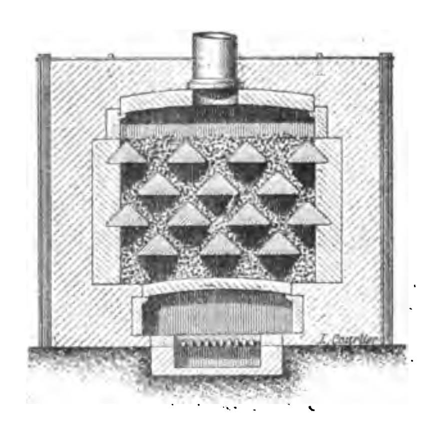


Fig. 658. — Grille Michel Perret à cônes. (Coupe transversale).

Dans un dispositif différent (fig. 658), le même inventeur a remplacé les dalles par des cônes en chicanes, en vue de simplifier l'opération de la descente.

On a imaginé de pousser à la limite extrême l'exiguïté des particules du combustible solide, au moyen de la pulvérisation. Dès 1822, Stanley a employé des fours à poussier de charbon [3]. C'est un ventilateur qui est chargé de lancer le poussier dans la chauffe, en même temps que l'air nécessaire à sa combustion. Les doses sont déterminées par un régulateur. On réalise ainsi une

[1] Foyers : Bréval. Bour. *Sixième Congrès des Ingénieurs en chef des Associations de propriétaires d'appareils à vapeur*, Paris, 1882, p. 47. — Koch. *Ibidem*, p. 50.

[2] Ansaloni. *Notice sur l'emploi des grilles Michel Perret, pour brûler les combustibles maigres et pulvérulents*, in-8°. — *Génie civil*, 29 décembre 1888 et 9 février 1889. — Armengaud. *Publication industrielle*, 31e vol., p. 92. — *Scientific American, supplement*, 28 novembre 1885, p. 8250.

[3] Foyers à poudre de charbon : Corbin. Denfer. *Traité des chaudières à vapeur*, p. 15. — Crampton. Bienaymé. *Les Machines marines*, p. 509. — Stephenson. *The Engineer*, 1877, p. 355. — Whelpley et Storer (*Annual Report of the Chief of the United States Bureau of steam engines for* 1876. — *Engineering*, 1871, p. 98 ; 1877, p. 335. — *Journal of Franklin Institute*, 1871, p. 198. — Rankine. *Manuel de la machine à vapeur*. Traduction Richard, p. 455). — Zeni. Denfer. *Traité des chaudières à vapeur*, p. 15.

fumivorité satisfaisante; mais la poussière est sujette à fixer l'hygroscopicité de l'atmosphère, et la conduite d'un pareil foyer est difficile. Ces appareils ne se sont pas répandus.

1068 — Le bois [1] est un combustible dont l'usage industriel se recommande dans certaines régions forestières. Les alandiers destinés à sa combustion sont formés d'une sole de briques réfractaires disposée en pente douce; à l'avant, une trémie de fonte occupe toute la largeur. Les bûches, d'une dimension un peu moindre, sont placées en travers et empilées les unes sur les autres. Leur poids écrase la braise qui se forme à la partie inférieure, et fait descendre la charge. L'air filtre de haut en bas à travers la masse, et entraîne les cendres. Le système de la flamme renversée convient bien à ce combustible.

On a également employé les copeaux [2], la sciure de bois [3], la paille [4], la tannée [5], ainsi que d'autres combustibles pauvres fournis par diverses industries [6].

[1] Chaudières à bois : *American machinist*, 14 mai 1891, p. 6. — Hirsch et Debize. *Leçons sur les machines à vapeur*, t. I, p. 426. — Ser. *Physique industrielle*, t. I, p. 436.

[2] Chaudière à copeaux de Conklin. *Scientific american*, 20 janvier 1883, p. 34.

[3] Chaudières à sciure (Denfer. *Traité des chaudières à vapeur*, p. 8. — *Scientific american*, 11 avril 1891, p. 231).

[4] Chaudières à paille Head et Shemloth. *Proceedings of the Institution of civil Engineers*, t. XLVIII.

[5] Chaudière à tannée : Crocket et Thompson. Thurston. *Journal of Franklin Institute*, 1875. — Kraft et Muller. *Annales industrielles*, 1870. — Chomienne. *Bulletin technologique de la Société des anciens Élèves des Écoles d'arts et métiers*, 1888, p 259. — Sauvage. *Annales des mines*, novembre-décembre 1890, p. 550. — Denfer. *Traité des chaudières à vapeur*, p. 9.

[6] Chaudière Godillot pour combustibles pauvres (*Génie civil*, 1er août 1885, p. 220. — *Bulletin de la Société d'encouragement*, 4e série, t. IV, p. 289. — *La Nature*, 26 avril 1889, p. 349. — *Congrès de mécanique appliquée de* 1889, t. III, p. 101). — Chaudière Twaiter, Stewart et Sturgeon pour combustibles et déchets de toute nature. *Revue industrielle*, 21 janvier 1880, p. 25.

§ 5

CHAUDIÈRES SANS FEU

1069 — Il est intéressant, dans certains cas particuliers [1], d'éviter qu'une locomotive porte en elle-même un foyer. Cependant, puisqu'elle est destinée à développer de l'énergie tout le long de son parcours, il faut bien que celle-ci soit empruntée à une source quelconque, qui sera presque toujours une chaudière à vapeur. La solution consiste alors à laisser fixe cette dernière, et à imaginer un artifice qui permette au véhicule de lui emprunter des doses d'énergie potentielle suffisantes pour le trajet qu'il doit accomplir, en venant se retremper périodiquement à son contact, pour reprendre chaque fois des forces nouvelles.

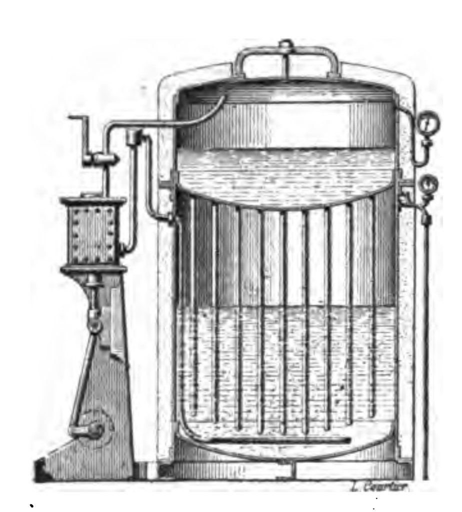


Fig. 159. — Chaudière à soude Honigmann. (Coupe verticale).

1070 — *Chaudière à soude Honigmann.* — Un premier exemple de cette combinaison se rencontre dans la chaudière à la soude de M. Honigmann [2]. Son

[1]) Par exemple dans les mines à grisou, dans les quartiers populeux où l'on veut éviter la fumée des tramways, etc.

[2]) *Génie civil*, t. IV, p. 142. — Riedler (*Revue universelle des mines et de la métallurgie*, 2e série, t. XV, p. 365. — Gustave Blum. *Revue générale des chemins de fer*, juillet 1885. — *Zeitschrift des Vereins deutscher Ingenieure*, t. XXVII, p. 729. — *Bulletin de la Société des Ingénieurs et Architectes autrichiens*, 15 décembre 1883. — *Annales de Poggendorf*, t. CIII, p. 130; CV, 85; CX, 564. — Richard. *La chaudière locomotive*, in-4°, p. 587. — Armengaud. *Publication industrielle*, 2e série, t. X, p. 73. — Sauvage. *Annales des mines*, novembre 1890, p. 590. — *Revue générale des chemins de fer*, 1885, 2e sem., p. 21. — *Revue des questions scientifiques de la Société de Bruxelles*, 20 janvier 1885, p. 285. — *Annales industrielles*, 1884, t. I, p. 178. — *Portefeuille*

emploi est fondé sur l'élévation de température que produit l'hydratation progressive d'une solution concentrée de soude caustique.

L'appareil présente deux capacités distinctes et superposées (fig. 659). Dans le récipient supérieur se trouve de l'eau pure qui entre en vapeur (au commencement à l'aide d'une mise en train artificielle, et ensuite par le jeu normal du fonctionnement). Cette vapeur se rend au cylindre moteur, et de là dans la cavité inférieure, où un tube horizontal percé de trous nombreux la met en contact avec la lessive alcaline, dans laquelle elle se condense. La température de cette solution s'élève, et permet ainsi de chauffer au bain-marie les nombreux tubes Field qui se rattachent à la vasque supérieure, de manière à entretenir la vaporisation.

Lorsque le titre de la dissolution sodique s'est trop abaissé, et que l'échauffement correspondant cesse d'être suffisant pour maintenir dans le compartiment supérieur la pression voulue, on évacue ce liquide au dehors, à l'aide d'un jeu de pression analogue à celui des *monte-jus*, et on le remplace par une nouvelle charge suffisamment concentrée. Puis on rapproche de nouveau cette liqueur par l'application de la chaleur d'un foyer fixe, dans lequel on utilise aussi complètement que possible la température des gaz brûlés, en opérant par échelons.

On remarquera que cet appareil remplit les fonctions de condenseur en même temps que celles de générateur.

1071 — *Chaudière à eau surchauffée de Lamm et Francq.* — Un moyen plus simple que le précédent, bien que comportant de moindres provisions d'énergie, a été proposé par le docteur Lamm, et perfectionné par M. Léon Francq ([1]).

économique des machines, 1884, p. 21; 1885, p. 190. — *Engineering*, 27 février 1885, p. 225. — Haton de la Goupillière. *Revue des travaux scientifiques*, t. IV, p. 265.

([1]) Francq (*La locomotive sans foyer*, in-8°. — *Revue industrielle*, 1880, p. 16, 48, 69). — *Génie civil*, t. XX, p. 300. — Poillon. *Les locomotives sans foyer*, in-18. — Tresca. *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, t. XCVIII, p. 1091. — Ulens. *Revue universelle des mines et de la métallurgie*, 1876, t. II, p. 1. — Flourens. *Société industrielle du nord de la France*, p. 1876. — Locomotive Francq et Mesnard. *Moniteur industriel*, 9 février 1892, p. 44. — Richard. *La chaudière locomotive*, in-4°, p. 586. — *Rapport de la Société néerlandaise de tramways*, Chaix, 1888. — Sauvage. *Annales*

Il consiste à enfermer une certaine quantité d'eau dans un corps cylindrique fortement constitué, et à la charger de calorique en la mettant en rapport avec la vapeur que fournit une chaudière fixe. Lorsque les deux récipients sont arrivés à l'équilibre de pression et de température, on interrompt la communication, et la locomotive est prête à partir (fig. 660).

La pression variera, bien entendu, depuis le maximum des pre-

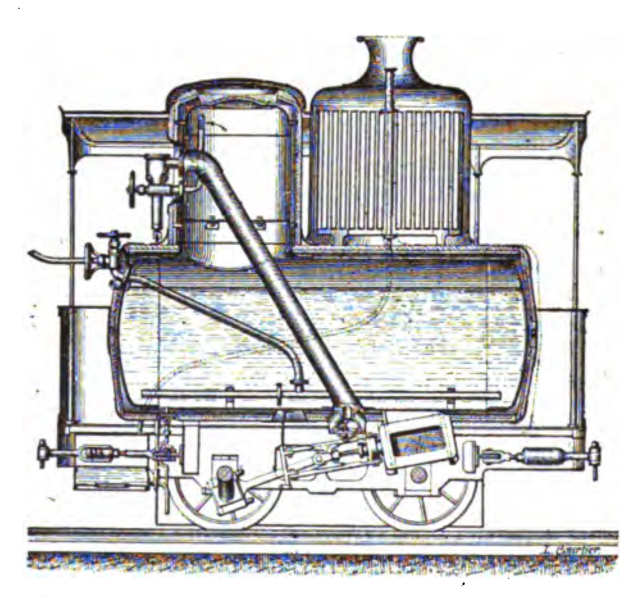


Fig. 660. — Locomotive sans foyer Lamm et Francq (coupe verticale).

miers instants jusqu'au degré final, où l'énergie est presque complètement épuisée. Cependant le moteur ne saurait s'accommoder d'un pareil régime. L'emploi d'un détendeur (n° 1104) s'impose donc. On fonctionne ordinairement à une température d'environ 200 degrés. Elle correspond à une tension de 16 kilogrammes,

des mines, novembre 1890, p. 590. — Ser. *Physique industrielle*, t. I, p. 485. — *Génie civil*, t. III, p. 148, 174. — Hirsch et Debize. *Leçons sur les machines à vapeur*, t. I, p. 545. — *Annales des ponts et chaussées*, 1874, 1er sem., p. 403; 1875, 2e sem., p. 353; 1878, 2e sem. — *Bulletin de la Société d'encouragement*, 11 mars 1892. — *Portefeuille économique des machines*, 1883, p. 4; 1886, p. 130. — *Les Mondes*, t. LI, p. 9. — Schæffer (*Railroad Gazette*, 25 août 1877. — *Engineering New*, février 1879). — *The Engineer*, 20 février 1874, p. 135. — Birk. *Die feuerlose Locomotive*, Vienne, 1885, in-8°.

que le régulateur de pression ramène à 3 ou 5 kilogrammes aux cylindres. Une tonne d'eau chaude, en abaissant ainsi sa température du chiffre de 200 à celui de 150 degrés, peut fournir à la vaporisation de 145 kilogrammes.

Le récipient est soigneusement enveloppé de matières calorifuges, pour éviter la déperdition de la chaleur motrice. La vapeur se sèche en traversant un tube immergé dans le bain surchauffé.

1072 — *Chaudière à huile.* — On a proposé de chauffer au moyen d'un bain-marie d'huile portée à 250 degrés, un petit récipient rempli d'eau, qui atteindrait dans ces conditions une pression d'environ 25 atmosphères. Un détendeur ramènerait à des tensions plus ordinaires sur le piston.

Le but d'une telle combinaison serait de restreindre les conséquences d'une explosion éventuelle, en raison du faible volume d'eau renfermé dans un tel générateur. Mais nous avons rencontré à cet égard, sous le nom d'inexplosibles, des solutions bien plus pratiques.

CHAPITRE LVIII

DÉTAILS DES GÉNÉRATEURS

—

§ 1

FOYER

1073 — *Porte du foyer.* — La porte du foyer [1] doit offrir des dimensions suffisantes pour le service, mais strictement, afin de diminuer l'importance du refroidissement qu'occasionne son ouverture. Le vide présente 22 à 35 centimètres de hauteur, sur 35 ou 40 de large. On en fait aussi de plus grandes à deux battants.

Cette porte est en fonte (fig. 661, 662). Elle est souvent composée de deux plaques, avec un passage d'air ménagé entre elles pour les refroidir. On doit employer une fermeture à clenche et mentonnet, afin d'éviter l'ouverture produite par une pression intérieure, et de prévenir, en cas d'accident, la projection d'un torrent d'eau bouillante et de vapeur.

Pour éviter le coup de froid que détermine dans l'intérieur l'ouverture de la porte, on peut disposer devant celle-ci un boulet suspendu à une chaîne qui passe sur des poulies et s'attache au registre. La présence de cet obstacle empêche l'ouverture, jusqu'à ce que le chauffeur l'ait remonté, en abaissant par cela même le registre.

[1] Portes de foyer : Henderson. *Engineering,* 22 avril 1881, p. 409. — Hennessy. *American machinist,* 9 juillet 1887, p. 7.
Pechar. *Die Lokomotiv Feuerbüchse,* 1884, Vienne.

On a également imaginé des connexions directes entre ce dernier et la porte du foyer ([1]).

Cette porte métallique est quelquefois remplacée par un tas de menu qui bouche l'ouverture, et à travers lequel on peut, à volonté, ménager une certaine filtration d'air. Quand ce combustible est carbonisé, on le pousse dans le feu, et on le remplace par une nouvelle charge.

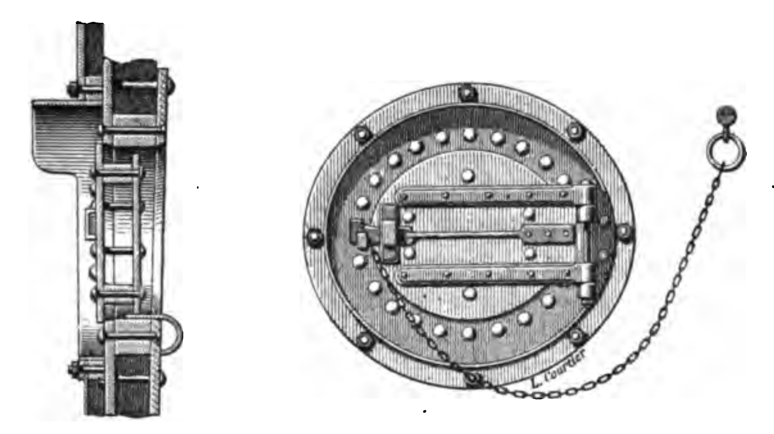


Fig. 661 et 662. — Porte de foyer (coupe et élévation).

1074 — *Boîte à feu.* — Entre la porte et la grille, se trouve un *seuil* destiné à éloigner celle-ci, en vue de protéger la première. On lui donne une pente de $\frac{1}{6}$ vers l'arrière.

A l'autre extrémité de la grille, se trouve le *pont* ou *autel.* Il sert à maintenir le combustible, et détermine dans la flamme une courbure qui contribue à en assurer le brassage.

1075 — La boîte à feu doit présenter au moins 0^{m},45 de hauteur au-dessus de la grille. Cette dimension dépasse même souvent 1 mètre. Une certaine élévation contribue à procurer une combustion plus complète.

Les parois du foyer sont entourées d'eau par dessus et latéra-

([1]) Registres fermant la cheminée avant d'ouvrir le foyer : Buisson. *Comptes rendus mensuels des séances de la Société de l'industrie minérale de Saint-Étienne.* — Thauvoye et Dernoncourt. Hirsch. *Rapport sur l'Exposition de* 1878, p. 161.

lement sur $0^m,25$ à $0^m,30$ d'épaisseur (n° 981). Celle-ci se trouve réduite dans les locomotives par le manque de place.

La boîte à feu se construit le plus souvent en cuivre, métal d une fabrication plus sûre que celle de l'acier, et en même temps moins sensible que ce dernier à l'action des gaz sulfureux, ainsi qu'aux variations de température. Cependant les locomotives américaines ont fréquemment des foyers en acier.

1076 — Sous la grille se trouve le cendrier. Sur les locomotives, il est fermé par le bas et ouvert du côté de la marche, afin que l'air s'y engouffre en raison de son mouvement relatif, de manière à augmenter le tirage.

Dans les chaudières fixes, le cendrier est souvent recouvert d'une couche d'eau, qui sert à éteindre les escarbilles, à réduire pour le chauffeur la fatigue du rayonnement, et à lui fournir par la réflexion l'image de son feu par dessous.

On règle le tirage en modifiant le degré d'ouverture des portes du cendrier.

1077 — *Registre.* — Un second moyen d'influencer le tirage se trouve placé à l'autre extrémité de l'appareil. C'est le *registre*. dont la manœuvre permet de faire varier le passage offert aux gaz dans le carneau ou dans la cheminée.

Cet organe peut être *levant* ou *tournant*. Ce dernier dispositif est préférable. On le met en mouvement à l'aide de tringles, de chaînes et de poulies.

Nous venons de voir que l'on doit effectuer sa fermeture d'une manière absolue au moment de l'ouverture des portes, soit à la main. soit à l'aide d'une commande mécanique. Il y a lieu d'intervenir également, soit par l'action directe du chauffeur, soit automatiquement[1], pour subordonner le degré d'ouverture aux variations de la marche.

[1] Registres-régulateurs : Curtis. *American machinist*, 2 mai 1885, p. 5; 21 avril 1888, p. 5. — Guillemaut. *Cinquième Congrès des Ingénieurs en chef des Associations de Propriétaires d'appareils à vapeur*, Lyon, 1881, p. 9. — Hoffmann. *American machinist*, 8 octobre 1887, p. 6. — Kellam. *Ibidem*, 8 juillet 1882, p. 8. — Mac Donald et Townsend. *Scientific american*, 27 févr. 1886, p. 136. — Poindron. *Cinquième Congrès des Ingénieurs*

Le registre *pyrométrique* Cleuet ([1]) est mis en action par l'influence de la température des gaz chauds. Un fléau horizontal en fonte porte à l'une de ses extrémités le registre, et à l'autre un contrepoids. Celui-ci est suspendu à une tige articulée, qui manœuvre une aiguille devant un cadre. Un tirant en cuivre agit sur le fléau d'une manière variable, en raison de la différence des dilatations de ce métal et de la fonte.

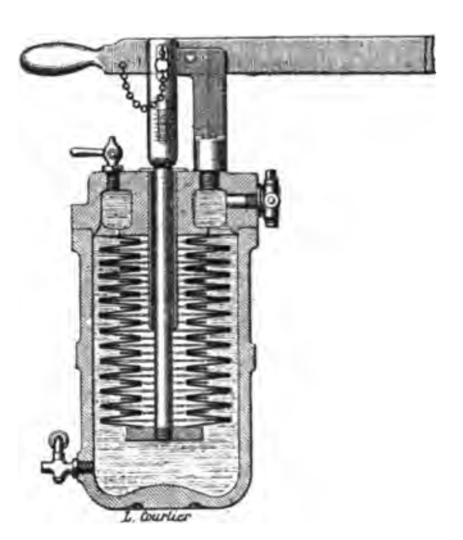


Fig. 663. — Régulateur de pression Belleville. (Coupe verticale).

Le registre automatique Deschamps ([2]), ainsi que celui de la chaudière Belleville ([3]) empruntent leur mode de mise en mouvement aux variations de pression de la chaudière. Une série de rondelles Belleville fléchit plus ou moins sous l'effort de cette pression (fig. 663), et sa déformation, transmise au dehors par une tige, actionne le registre à l'aide d'une transmission qui en amplifie la valeur.

La manœuvre de cet organe sert, à l'occasion, pour faire cesser un ronflement sonore et très fatigant, qui tient à l'harmonie de certaines proportions entre les divers éléments de la colonne gazeuse. On détruit cet accord en modifiant la section d'écoulement.

en chef des Associations de Propriétaires d'appareils à vapeur, Lyon 1881, p. 10. — RAMSAY. *The Engineer*, 18 juillet 1890, p. 55. — RAY. *Annales industrielles*, 25 octobre 1891, p. 531. — REVET. *Cinquième Congrès des Ingénieurs en chef des Associations de Propriétaires d'appareils à vapeur*, Lyon, 1881, p. 8. — ROBERTSON. *American machinist*, 17 mars 1888, p. 8. — SPENCER. *Ibidem*, 2 janvier 1886, p. 2. — WHITE et CARSON. *Chronique industrielle*, 13 mai 1888, p. 235.

([1]) Hirsch. *Rapport sur l'Exposition de* 1878, p. 160.

([2]) *Ibidem*, p. 160.

([3]) Hirsch et Debize. *Leçons sur les machines à vapeur*, t. I, p. 615.

§ 2

GRILLE

1078 — *Généralités.* — La superficie de la grille [1] d'un générateur est, toutes choses égales d'ailleurs, proportionnelle à la consommation de combustible, et par suite à la surface de chauffe.

On ne saurait passer moins de 15 kilogrammes de charbon par heure et par mètre carré de grille, sans quoi la combustion marcherait mal. Une allure lente consomme de 15 à 30 kilogrammes de combustible; une marche moyenne : 40 à 80; un fonctionnement actif : 100 à 120. On ne franchit guère cette limite avec le tirage naturel; mais quand on emploie l'aspiration par l'échappement, et surtout le vent forcé proprement dit (n° 1095), on atteint, et l'on dépasse même les chiffres de 250 kilogrammes dans les locomotives, 400 pour les torpilleurs, 650 sur certains yachts rapides.

1079 — Connaissant dans chaque cas la puissance en chevaux, ainsi que la consommation de combustible par cheval-heure sur laquelle on croit pouvoir compter, on en déduira la surface de grille, après avoir choisi parmi les nombres précédents celui qui paraîtra se rapporter le mieux aux conditions du projet.

Supposons par exemple qu'il s'agisse d'une machine de 100 chevaux, consommant 4 kilogrammes de charbon par cheval-heure, en admettant que l'on puisse passer 100 kilogrammes de combustible

[1] Hirsch et Debize. *Leçons sur les machines à vapeur*, t. I, p. 393. — Essai comparatif de diverses grilles. *Revue universelle des mines et de la métallurgie*, 1re série, t. XIX, p. 161. — Expériences de Kinnear Clarke. *Proceedings of the Institution of civil Engineers*, t. XII, 1852; XLVI, 1876. — Longridge. *Ibidem*, t. LII, 1878. — *Bulletin de la Société industrielle de Mulhouse*, juin 1875. — Rankine. *Manuel de la machine à vapeur*. Traduction Richard, p. 624. — Havrez. *Annales du Génie civil*, août-septembre 1874. — Expériences de Geoffroy. Couche. *Voie, matériel roulant, exploitation technique des chemins de fer*, t. III, p. 35. — *Railway machinery*, p. 158. — *Steam collieries Association of Newcastle on Tyne*, 1857. — Lavington et Fletcher. *South Lancashire and Cheshire coal Association*, 1869. — *Royal agricultural Society of England*, 1872. — Clarck. *A manual of rules tables and data for mechanical Engineers*, 1876.

par mètre carré de grille et par heure, il faudra pour les 100 chevaux 400 kilogrammes de combustible, et par suite 4 mètres carrés de surface de grille.

1080 — On peut aussi rattacher directement ce calcul à la surface de chauffe. Supposons par exemple que 1 kilogramme du combustible adopté soit capable de volatiliser 6 kilogrammes d'eau ; que le type de chaudière que l'on a en vue puisse vaporiser 25 kilogrammes à l'heure par mètre carré de surface de chauffe, et permette de passer 100 kilogrammes de houille à l'heure par mètre carré de grille. On fera le raisonnement suivant :

1° A 1 mètre carré de grille correspondent 100 kilogrammes de combustible; 2° chacun de ces kilogrammes de charbon vaporise 6 kilogrammes d'eau : 1 mètre carré de grille correspond donc à 600 kilogrammes d'eau ; 3° chacun de ces kilogrammes se rapporte à $\frac{1}{25}$ de mètre carré de surface de chauffe : 1 mètre carré de grille correspond par suite à $\frac{600}{25}$ ou 24 mètres carrés de surface de chauffe. Finalement la surface de grille devra être égale à $\frac{1}{24}$ ou environ 4 % de la surface de chauffe.

1081 — Le rapport suivant lequel il y a lieu de répartir le plein et le vide dans la superficie adoptée pour la grille, constitue l'un des éléments essentiels de la question. Il faut donner un total de vide suffisant pour laisser affluer l'air suivant la proportion nécessaire; et l'on doit, d'autre part, le fractionner de manière que la largeur de chaque intervalle ne laisse pas filtrer une trop grande quantité de menu et d'escarbilles. Cette perte, qui atteint au moins 3 %, augmente avec la prédisposition du charbon à donner du menu et à s'effriter sous l'impression de la chaleur, avec l'usure des barreaux, avec la trépidation des locomotives. Le rapport le plus convenable du plein au vide dépend donc dans chaque cas de la nature du combustible.

On donne en général, pour les chaudières fixes, un quart de vide

et trois quarts de plein. On va jusqu'à l'égalité dans les locomotives.

La largeur absolue des intervalles varie de 6 à 12 millimètres; celle du plein, de 12 à 20 millimètres.

Le total du vide doit, autant que possible, se retrouver comme un minimum dans la section du cendrier, des carneaux, de la cheminée.

1082 — *Grille ordinaire.* — Le contour des grilles est la plupart du temps rectangulaire. La forme circulaire nécessite des barreaux de rechange de diverses dimensions, ou le remplacement de la grille entière dès la moindre avarie.

La longueur du rectangle ne doit pas dépasser $1^m,50$ ou comme extrême limite 2 mètres, afin de ne pas excéder les moyens d'action de l'ouvrier. Il serait sans cela disposé à négliger le fond de la chauffe, où s'établiraient par suite des courants nuisibles d'air froid.

La largeur reste inférieure à 1 mètre, si le foyer n'a qu'une seule porte, afin de permettre au chauffeur de travailler dans les angles.

1083 — La grille est formée de barreaux en fonte, ou quelquefois en fer (fig. 664, 665).

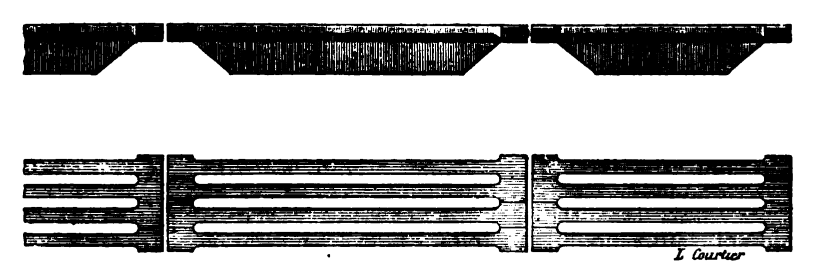


Fig. 664 et 665. — Grille (plan et élévation).

Ils sont indépendants, pour faciliter le décrassage, et permettre de jeter bas le feu en cas de danger. Un *jette-feu* est indispensable. Souvent, dans le but de ne pas trop compliquer le service, on fait venir de fonte les barreaux par groupes de deux, trois ou quatre. Si la longueur approche de 2 mètres, on la compose de deux mises indépendantes, supportées par une barre transversale.

Pour maintenir avec précision la dimension des vides, on élargit

les barreaux à leurs extrémités, et au besoin en leur milieu, de manière que les *talons* soient jointifs, sauf le jeu nécessaire aux dilatations (1).

1084 — La grille Erskine (2) a des barreaux ondulés, afin d'augmenter par ces zigzags les contacts rafraîchissants de l'air. Dans le type Belleville, on les fait alterner avec des barres rectilignes. Les barreaux ondulés de Knœppel (3) sont en outre perforés (fig. 666). Les constructeurs sont arrivés dans cette voie à de très grandes complications (4).

La section transversale d'un barreau est souvent trapézoïdale,

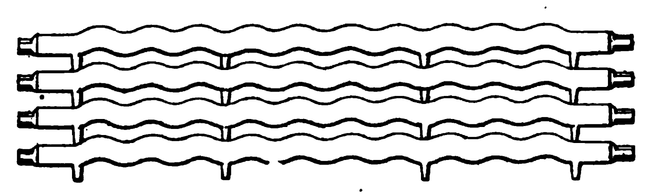


Fig. 666. — Grille à air Knœppel (plan).

avec sa grande base en haut, afin de faciliter le dégagement et la chute des escarbilles, une fois qu'elles sont engagées dans l'un des intervalles.

La hauteur est notable (jusqu'à $0^m,30$ dans la grille Corbin), pour donner plus de prise au refroidissement par l'air.

Dans la grille Desgouttes (5), le profil est bombé en son milieu. L'inventeur pense faciliter par là le chargement sur le dos d'âne, et la répartition latérale du combustible.

1085 — *Grilles à air*. — On a cherché des moyens de refroidissement plus actifs que ces divers artifices dans l'emploi de

(1) On aura soin de tenir compte de ce que le coefficient de dilatation augmente d'environ 3 à 4 % après des recuits successifs.

(2) Richard. *La chaudière locomotive*, p. 73.

(3) *Ibidem*.

(4) Grilles Burke, Geogegan, Henzel, Hibbert et Cooke, Moussèron, Newbold (Richard. *La chaudière locomotive*, p. 74).

(5) *Ibidem*, p. 82.

barreaux creux (1), à l'intérieur desquels on fait circuler de l'air. Ainsi échauffé à l'occaison de l'influence conservatrice qu'il exerce sur le métal, celui-ci se trouve lui-même mieux préparé pour la combustion. On peut à cet égard laisser les courants indépendants, ou bien associer les barreaux en serpentin. La conservation de ces derniers est plus nette avec le premier mode, mais alors le fluide élève peu sa température.

L'emploi de ces engins est surtout utile avec certains combustibles, tels que les anthracites, qui développent une température très élevée. Il s'accommode bien du *vent forcé* (n° 1095), qui facilite le passage du courant à travers ces tubes étroits.

C'est dans cet ordre d'idées que l'on fait traverser les barreaux de la grille Perkins tout à la fois par l'air et par des jets de vapeur, pour y activer la circulation.

1086 — *Grilles à eau.* — On emploie également comme un réfrigérant plus actif l'eau, dont la température se trouve utilisée au moment où elle pénètre dans la chaudière.

Avec le système Michel Perret (2), les barreaux sont munis de nervures très saillantes, qui plongent dans un bain liquide placé sur la sole du cendrier.

Pour la plupart de ces grilles (3), telles que le type Ingliss, on reproduit l'emploi des barreaux creux parcourus par l'eau d'alimentation.

(1) Grilles à air : Dobson. Richard. *La chaudière locomotive*, p. 72. — Dulac (*Génie civil*, t. VII, p. 393. — *Revue industrielle*, 1er septembre 1887, p. 348. — *Portefeuille économique des machines*, 3e série, t. XII, p. 126). — *Elephant. Engineering*, 16 avril 1880, p. 302. — Hill. Richard et Baclé. *Guide du mécanicien conducteur de locomotive*, p. 23. — Holling Drake. *Revue industrielle*, 5 juillet 1890, p. 265. — Hooper. *American machinist*, 4 décembre 1886, p. 7. — Miller. *Scientific american*, 3 octobre 1885, p. 210. — Roncourt. *Guide manuel du chauffeur*, p. 46. — Smith. *Engineering*, 1875, t. I, p. 348.

(2) *Revue industrielle*, 17 mars 1880, p. 119. — *Bulletin de la Société industrielle de Rouen*, 1886, p. 74. — *La Nature*, 10 mars 1883, p. 22. — *Comptes rendus mensuels des séances de la Société de l'Industrie minérale de Saint-Étienne*, juin 1879, p. 134. — *Neuvième Congrès des Ingénieurs en chef des Associations de Propriétaires d'appareils à vapeur*, Paris, 1886, p. 141.

(3) Grilles à eau : Allen. Clarke. *Recent practice*, p. 30. — Boreiko. Richard. *La chaudière locomotive*, p. 69. — Cropper. *Iron*, 6 septembre 1879, p. 291. — Ellis. Richard. *La chaudière locomotive*, p. 69. — Evans. *Ibidem*. — Michel et Boisselier. *Ibidem*. —

1087 — *Grilles mécaniques*. — Au bout de trois ou quatre heures, suivant la qualité du combustible, il devient ordinairement nécessaire de procéder au décrassage des grilles, afin de les débarrasser des *mâchefers* qui les encombrent. On désigne sous ce nom une sorte de scorie liquide, qui provient de la fusion d'une partie des cendres et qui se soude au métal rougi.

Cette opération est des plus pénibles. On a cherché à la faciliter

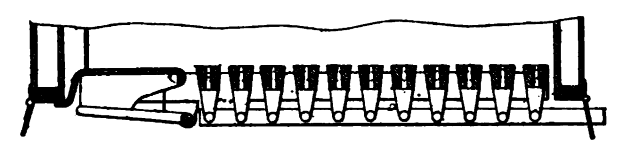


Fig. 667. — Grille à secousses (coupe verticale).

à l'aide de certains mouvements imprimés mécaniquement aux barreaux (fig. 667, 668). Dans la grille Wackernie [1], on communique à ces derniers des balancements par séries paire ou impaire. Ceux de la grille Holmes et Walker [2] reçoivent des secousses.

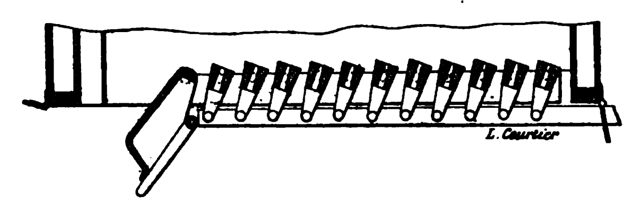


Fig. 668. — Grille à secousses (coupe verticale).

La grille Schmitz [3] est formée de barreaux cylindriques percés de trous. On leur imprime, à l'aide de roues dentées, une demi-révolution sur eux-mêmes.

Ces appareils sont connus sous le nom de *grilles mécaniques* [4],

Motensen. *Ibidem*. — Robinson. *Ibidem*. — Sharpe. *Engineering*, 23 janvier 1885, p. 84. — Webb. *Ibidem*, 4 octobre 1872.

(1) Richard. *La chaudière locomotive*, p. 79. — Ser. *Physique industrielle*, t. I, p. 423. — *Revue technique de l'Exposition de* 1889, 6e partie, t. I, p. 386.

(2) Haton de la Goupillière. *Annales des mines*, août 1879, p. 164. — *Engineering*, 1876, t. I, p. 244.

(3) Clérault. *Annales des mines*, 7e série, t. XIII, p. 527. — Hirsch. *Rapport sur l'Exposition de* 1878, p. 152.

(4) *Manuel d'Heusinger von Waldegg*. — *Catéchisme de Forney*. — *Revue univer-*

et il en existe les types les plus divers ([1]). Les uns sollicitent doucement les surfaces inférieures de la charge, afin de faire tomber les cendres sans opérer un bouleversement complet ; d'autres agissent énergiquement pour briser les mâchefers ([2]).

§ 3

FUMIVORITÉ

1088 — *Généralités*. — De tous temps on s'est préoccupé de la suppression de la fumée ([3]). C'était, au point de vue mécanique, dans la pensée de récupérer les calories qui correspondent au carbone ainsi entraîné à l'état fuligineux. Mais une connaissance plus précise de la question a montré que cette économie serait minime, et que les moyens proposés occasionnent en sens inverse des pertes plus sensibles. On en est arrivé à considérer comme économique la marche à fumée noire.

Toutefois sous d'autres points de vue la question a gardé son

selle des mines et de la métallurgie, 1re série, t. VI, p. 343. — *The Engineer*, 24 octobre 1890, p. 333. — *American machinist*, 4 septembre 1886, p. 7 ; 21 août 1890, p. 11.

([1]) Grilles mécaniques : Bolzano (Chabaud. *Bulletin de la Société de l'Industrie minérale de Saint-Étienne*, 2e série, t. III, p. 159. — *The Engineer*, novembre 1872). — Brums. *Engineering*, 23 septembre 1887, p. 337. — Dalubac. Vigreux. *Revue technique de l'Exposition de* 1889, n° 2, p. 69. — Dilwinn et Henderson. *Engineering*, 1874, p. 214. — Dougall. *Ibidem*, 18 mars 1881, p. 281. — Dunning. *Scientific american*, 18 février 1888, p. 99. — Helix. *Annales industrielles*, 26 juillet 1885, p. 106. — Holroyd. *The Engineer*, 1877, p. 178. — Livet. *The colonies and India Suppl.*, 29 décembre 1882. p. 35. — Mac Dougall. *Annales industrielles*, 26 juillet 1885, p. 108. — Price. *Scientific american*, 10 mai 1884, p. 291. — Proctor. *Annales industrielles*, 26 juillet 1885, p. 110. — Roney (*The Engineer*, 19 septembre 1890, p. 232. — *Scientific american supplement*, 27 septembre 1890, p. 12 280). — Schultz Robert. *Annales industrielles*, 26 juillet 1885, p. 110. — Wye William. Ser. *Physique industrielle*, t. I, p. 428.

([2]) Grilles mécaniques : Bannisier, Bessemer, Broussas, Chanter et Annain, Clay, Delèvaque, Gouget, Hall, Hampton, Holt, Howe, Knowelders, Poole, Ryder, Sébille, Smith (Richard. *La chaudière locomotive*, p. 77).

([3]) Haage. Sur les foyers fumivores. *Annales industrielles*, 26 juillet 1885, p. 104. — Knapp. *Traité de chimie industrielle*. Traduction Mérijot et Debize, t. II, p. 330. — Mille. *Bulletin de la Société d'encouragement*, 1855, p. 132. — Rapport Dubied et Burnat. *Bulletin de la Société industrielle de Mulhouse*. — *Portefeuille économique des machines*, 1869, pl. 22, 25. — *Annales des mines*, 4e série, t. XI, p. 149 ; 5e série, VIII, 101 ; XIII, 175 ; 6e série, II, 343, 365 ; IV, 127, 197, 204, 213, 511, 514 ; V, 175 ; VI, 515 ; IX, 307. — Flimmer. *Sur la combustion sans fumée*, Leipzig, in-8°, 1883.

importance. La fumée reste un grave inconvénient pour les voisins d'une usine, pour les voyageurs qui suivent la locomotive, pour le service à bord des navires de guerre, que ce panache noir signale en outre à l'ennemi. Les conseils d'hygiène n'ont cessé d'en réclamer la suppression, et l'administration, dans les divers pays, a édicté à cet égard un grand nombre de règlements. Malheureusement les difficultés de la question ont beaucoup contribué à les tenir en échec [1]. D'ailleurs la fumée des établissements industriels entraîne bien d'autres inconvénients que ceux des matières fuligineuses [2].

1089 — Les praticiens sont aujourd'hui d'accord pour reconnaître que le meilleur des moyens de fumivorité consiste dans l'emploi d'un bon chauffeur, qui se conforme attentivement aux principes énoncés ci-dessus (n° 968).

Parmi les procédés artificiels, on peut signaler d'abord le lavage des fumées. Dans ce principe, on faisait parcourir au courant gazeux une galerie suffisamment longue sous une pluie assez abondante. Ce moyen n'a pas réussi. Il était coûteux, encombrant, compliqué, et avait pour premier résultat de ralentir le tirage.

Les autres systèmes [3] peuvent être répartis en deux catégories,

(1) L'article 19 du décret du 25 janvier 1865 avait prescrit que le foyer des chaudières de toute catégorie devait brûler sa fumée. Celui du 30 avril 1880, qui l'a abrogé, a omis intentionnellement toute disposition analogue.

(2) Schrœder et Reuss. *Les dommages causés à la végétation par les fumées*, Berlin, in-4°, 1883.

(3) Fumivores : ADAM. *Annales industrielles*, 19 juillet 1885, p. 86. — ARGAND. Hirsch et Debize. *Leçons sur les machines à vapeur*, t. I, p. 415. — ARNOTT. Denfer. *Traité des chaudières à vapeur*, p. 11. — BEAUFUMÉ (*Ibidem.*, p. 13. — Hirsch et Debize. *Leçons sur les machines à vapeur*, t. I, p. 415). — BOTTYER. *Annales industrielles*, 19 juillet 1885, p. 87. — BOURNE. Bienaymé. *Les machines marines*, p. 510. — BRUNTON. Denfer. *Traité des chaudières à vapeur*, p. 11. — CHODZKO. *Ibidem*. — CLARKE. Rankine. *Manuel de la machine à vapeur*. Traduction Richard, p. 296. — COHEN. *Génie civil*, t. XVII, p. 13 ; XX, 268. — CRINER (*Sixième Congrès des Ingénieurs en chef des Associations de Propriétaires d'appareils à vapeur*, Paris, 1882, p. 41. — *Neuvième Congrès*, Paris, 1886, p. 80. — Baer. *Bulletin de l'Association amicale des Élèves de l'École des mines de Paris*, 1885). — DARCET (Ser. *Physique industrielle*, t. I, p. 427. — Hirsch et Debize. *Leçons sur les machines à vapeur*, t. I, p. 455). — DONNELEY. *Bulletin technologique de la Société des anciens Élèves des Écoles d'arts et métiers*, novembre 1887, p. 800. — DOUGLAS. Hirsch et Debize. *Leçons sur les machines à vapeur*, t. I, p. 485. — FLAMMERY. *Proceedings of the Institution of civil Engineers*, avril 1882, p. 261. — FONTENAY. Ser. *Physique industrielle*, t. I, p. 446. — GARDNER. Ledieu. *Nouvelles machines marines*, t. III, p. 161. — GRAR. Ser. *Physique industrielle*, t. I, p. 440. — HASECOSTER.

suivant qu'on s'attache à influencer directement la charge solide à l'aide de moyens mécaniques, ou la masse gazeuse par des procédés se rattachant à la ventilation.

1090 — *Chargeurs mécaniques.* — La première classe de ces appareils est celle des *chargeurs mécaniques* (¹). On s'y propose de réaliser automatiquement, ou de faciliter tout au moins l'application par le chauffeur des principes de chargement que nous venons de rappeler (n° 968).

La *chaîne sans fin* de Juckes ou de Tailfer (²), qui a été souvent

Scientific american, 6 novembre 1886, p. 290. — Heiser. *Génie civil*, 6 décembre 1884, p. 92. — Holmes. Hirsch et Debize. *Leçons sur les machines à vapeur*, t. I, p. 432. — Hopcraft. *La Métallurgie*, 13 février 1889, p. 173. — Howatson. Hirsch et Debize. *Leçons sur les machines à vapeur*, t. I, p. 432. — Jenkins. *Ibidem*, p. 435. — Lees. *Ibidem*, p. 435. — Lefroy. Ser. *Physique industrielle*, t. I, p. 448. — Locap. *Revue industrielle*, 23 décembre 1886, p. 521. — Lowe. *American machinist*, 18 septembre 1886, p. 1. — Mahony. *Ibidem*, 23 juillet 1881, p. 1. — Malmor et Pronier. Denfer. *Traité des chaudières à vapeur*, p. 13. — Miller. *Scientific american*, 1er février 1890, p. 68. — Molinos et Pronier. Ser. *Physique industrielle*, t. I, p. 451. — Muller. Denfer. *Traité des chaudières à vapeur*, p. 13. — Népilly. *Quatrième session du Congrès international des chemins de fer*, question X, p. 6. — Pain. *Scientific american*, 2 avril 1887, p. 217. — Palazot (Denfer. *Traité des chaudières à vapeur*, p. 11). — Hirsch et Debize. *Leçons sur les machines à vapeur*, t. I, p. 415). — Parkes. *Ibidem*. — Peslin. *Scientific american*, 22 août 1885. — Petton. *Iron*, 9 janvier 1880, p. 22. — Player (Denfer. *Traité des chaudières à vapeur*, p. 11. — Ser. *Physique industrielle*, t. I, p. 431). — Raven. *Chronique industrielle*, 4 avril 1886, p. 162. — Rœsicke. *Bulletin technologique de la Société des anciens Élèves des Écoles d'arts et métiers*, novembre 1887, p. 805. — Sickel. *Scientific american supplement*, 1er février 1890, p. 11739. — Silvester. *Engineering*, 24 septembre 1886, p. 327. — Smith. *Scientific american supplement*, 19 janvier 1884, p. 6698. — Spencer (*Proceedings of the Institution of civil Engineers*, 1890-91. — *Engineering*, 6 février 1891, p. 172). — Thierry (Ledieu, *Nouvelles machines marines*, t. III, p. 172. — Denfer. *Traité des chaudières à vapeur*, p. 13. — Hirsch et Debize. *Leçons sur les machines à vapeur*, t. I, p. 415. — Ser. *Physique industrielle*, t. I, p. 442). — Thomas. *Ibidem*, p. 446. — Tissot Verdié. *Quatrième Congrès des Ingénieurs en chef des Associations de Propriétaires d'appareils à vapeur*, Rouen, 1881, p. 47. — Turck. Hirsch et Debize. *Leçons sur les machines à vapeur*, t. I, p. 415. — Weltinger. *American machinist*, 20 août 1887, p. 7. — Williams. Rankine. *Manuel de la machine à vapeur*. Traduction Richard, p. 296. — Willoughby. *The Engineer*, 15 mai 1891, p. 395. — Wright. *Scientific american*, 18 juillet 1885, p. 34.

(¹) Chargeurs automatiques : Mac-Millan. *Revue industrielle*, 14 juillet 1880, p. 274. — Proctor. *Ibidem*, 22 novembre 1882, p. 469. — Schultz, Rœber et Schlumberger (*Septième Congrès des Ingénieurs en chef des Associations de Propriétaires d'appareils à vapeur*, Bordeaux, 1882, p. 39. — *Neuvième Congrès*, Paris, 1886, p. 44). — Sinclair. *Ibidem*, p. 52. — Vicars. *Ibidem*, p. 48.

Hildebrandt. *Sur les dispositions mécaniques pour le chauffage des chaudières à vapeur*, Berlin, in-8°, 1880.

(²) Callon. *Cours de machines*, t. II, p. 430. — Hirsch et Debize. *Leçons sur les ma-*

imitée, procède lentement et d'un mouvement continu de l'avant à l'arrière du foyer (fig. 669). On y charge le combustible en amont, et il se transporte progressivement vers l'autel, où la chaine se dérobe en dessous à l'aide de ses articulations. Le combustible traverse ainsi successivement les diverses phases propices à sa meilleure utilisation. Malheureusement les charnières s'encrassent, les chaînons deviennent cassants, et cette allure constante se prête

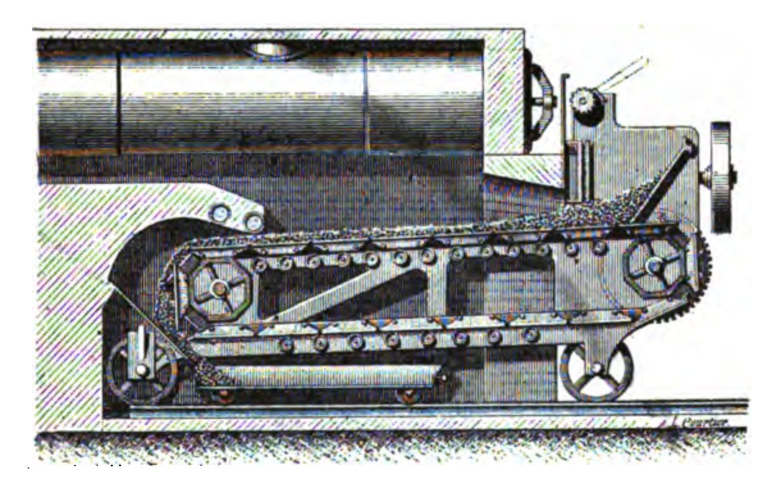


Fig. 669. — Grille sans fin Tailfer (coupe longitudinale).

mal aux coups de collier. Ce système est coûteux, et il exige pour les chauffeurs une éducation spéciale.

La grille circulaire rotative Hopcrafft ([1]) poursuit un résultat analogue, d'une manière plus simple au point de vue mécanique. On charge toujours au même point de la circonférence, et la rotation lente de la grille autour de son centre fait traverser successivement à ce charbon les diverses phases de la combustion, qui se trouvent échelonnées à la périphérie.

1091 — La *vis sans fin* de George ([2]) permettait d'alimenter le

chines à vapeur, t. I, p. 483. — Denfer. *Traité des chaudières à vapeur*, p. 11. — Ledieu. *Nouvelles machines marines*, t. III, p. 171.

([1]) *Revue industrielle*, 25 mai 1889, p. 201. — *Chronique industrielle*, 10 avril 1889, p. 1071. — Ser. *Physique industrielle*, t. I, p. 439.

([2]) Callon. *Cours de machines*, t. II, p. 431.

foyer de combustible frais par-dessous la masse incandescente, en faisant remonter progressivement les charges par la rotation de cette vis verticale.

Les *poussoirs mécaniques* de Duméry ([1]) remplissent la même fonction, avec moins de netteté théorique, mais plus d'efficacité réelle, bien qu'ils aient été également abandonnés. On charge sur les côtés d'une grille en bosse (fig. 670), et des poussoirs animés d'un mouvement pendulaire refoulent la charge vers le dos d'âne, en la faisant pénétrer sous la masse embrasée.

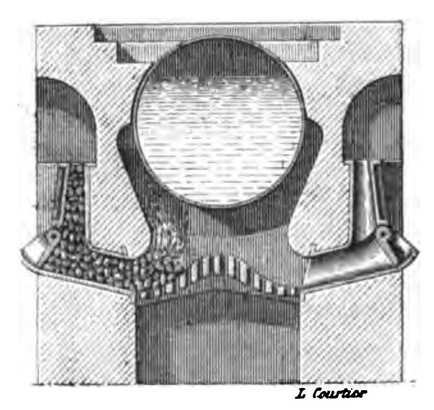


Fig. 670. — Fumivore Duméry (coupe verticale).

1092 — *Grilles à gradins*. — La *grille à gradins* ([2]) nous présente un principe mixte, qui tient à la fois du mode de chargement et de celui de l'aération. Elle est disposée (fig. 671, 672) comme un escalier, dont les marches planes se recouvrent un peu en projection horizontale. Le combustible que l'on charge à la partie supérieure se distribue dans son ensemble suivant un plan incliné, tandis que l'air filtre horizontalement entre les divers degrés. Ce

([1]) Hirsch et Debize. *Leçons sur les machines à vapeur*, t. I, p. 426. — Ser. *Physique industrielle*, t. I, p. 438.

([2]) Grilles à gradins : Chobrzinski et de Marsilly. Hirsch et Debize. *Leçons sur les machines à vapeur*, t. I, p. 404. — Frankel. *Annales industrielles*, 26 juillet 1885, p. 44. — Hangen. Hirsch et Debize. *Leçons sur les machines à vapeur*, t. I, p. 428. — Haupt. *Annales industrielles*, 26 juillet 1885, p. 104. — Heiser. *Ibidem*. — Kuhn. *Ibidem*, p. 106. — Lang. Ledieu. *Nouvelles machines marines*, t. III, p. 171. — Otto Thost. *Revue technique des inventions modernes*, p. 920

dispositif convient surtout aux menus plus ou moins secs, qui

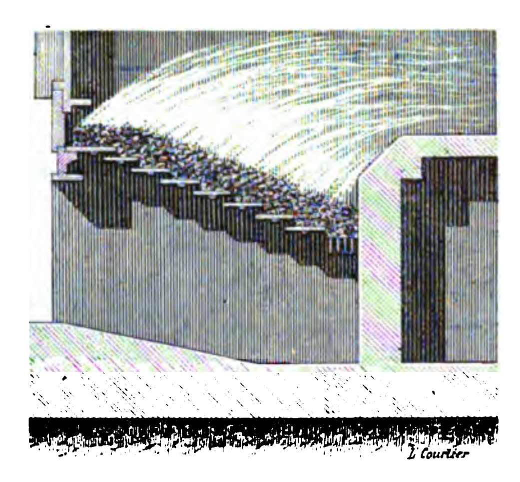


Fig. 671. — Grille à gradins (coupe verticale).

obstrueraient les vides des grilles ordinaires, ou bien passeraient

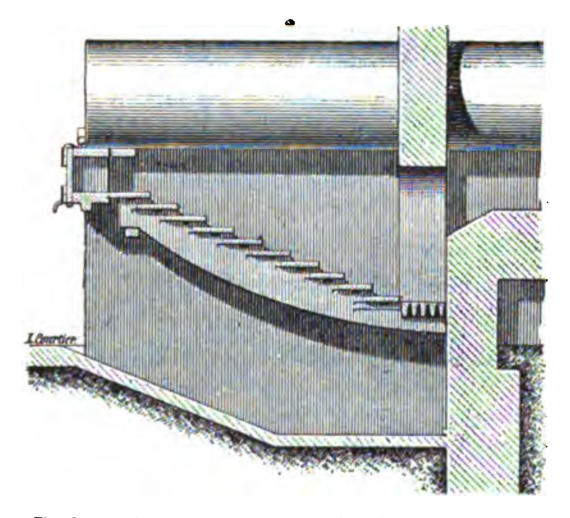


Fig. 672. — Grille Chobrzinsky et de Marsilly (coupe verticale).

au travers. Le chauffeur aide la descente progressive du charbon, au fur et à mesure de l'avancement de sa combustion.

Dans la *grille-pavillon* de M. Godillot ([1]), les barreaux ne sont plus rectilignes mais arqués, et le talus formé par le charbon prend la forme conique (fig. 673).

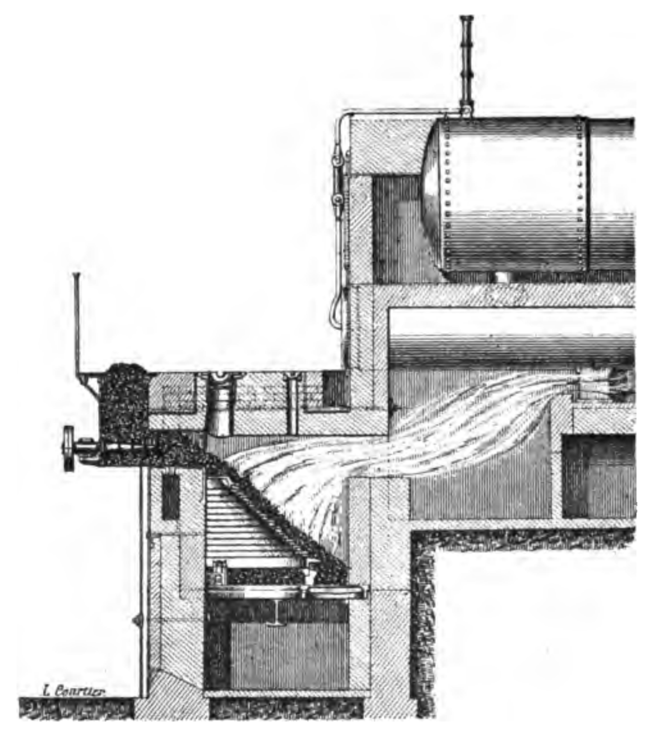


Fig. 673. — Grille Godillot (coupe verticale).

1093 — *Fumivores pneumatiques.* — Certaines locomotives indiennes sont munies de l'*auvant* de Carrick ([2]), destiné à rabattre sur le feu une lame d'air que laisse pénétrer la porte du foyer.

Le *foyer Tenbrinck* ([3]) utilise comme surface de chauffe un

([1]) *Revue des appareils à vapeur*, 1er septembre 1885. — *Revue technique de l'Exposition de* 1889, 6e partie, t. I, p. 525.

([2]) Richard et Baclé. *Manuel du mécanicien conducteur de locomotive*, p. 23.

([3]) *Annales industrielles*, 26 juillet 1885, p. 106. — Armengaud. *Publication industrielle*, 23e vol. — Hirsch et Debize. *Leçons sur les machines à vapeur*, t. I, p. 437. — Bienaymé. *Les machines marines*, p. 511. — Denfer. *Traité des chaudières*, p. 11. — Couche (*Voie, matériel roulant, exploitation technique des chemins de fer*, t. III, p. 222. — *Emploi de la houille dans les foyers Tenbrinck*, in-8°). — *Septième Congrès des Ingénieurs en chef des Associations de Propriétaires d'appareils à vapeur*, Bordeaux, 1882, p. 49. — *Neuvième Congrès*, Paris, 1886, p. 61.

obstacle analogue (fig. 674). On dispose dans la boîte à feu un bouilleur, qui a pour effet d'infléchir le torrent de la fumée distillée par la houille, en lui fermant l'accès direct des tubes de flamme, et lui donnant mieux le temps de se brûler. Ce bouilleur présente en même temps l'avantage de protéger la plaque tubulaire contre un

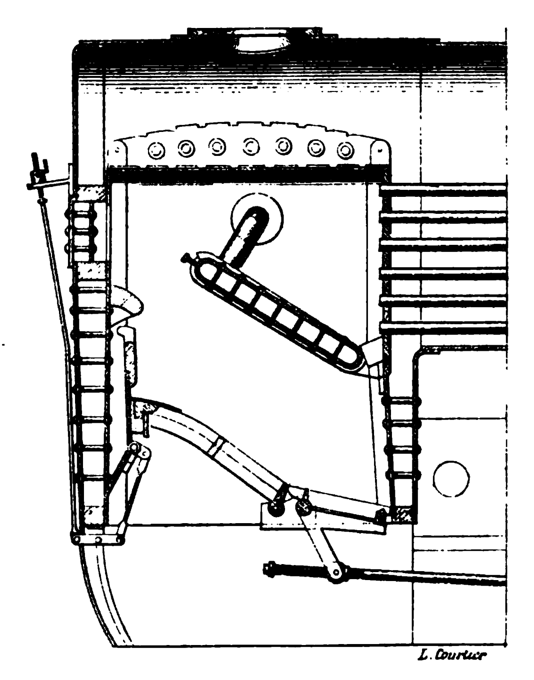


Fig. 674. — Foyer Tenbrink (coupe verticale).

coup de feu trop direct. Le chargement s'opère d'une manière à peu près continue, le charbon progressant peu à peu le long de la partie inclinée. Une lame d'air plongeante est admise au-dessus, pour brûler tous les gaz combustibles.

On s'est servi dans un but analogue ([1]) d'entretoises perforées de part en part ([2]) pour lancer, à 25 ou 30 centimètres au-dessus de la grille, de petits jets d'air destinés à oxyder les gaz combustibles.

([1]) Richard et Baclé. *Manuel du mécanicien conducteur de locomotive*, p. 23.

([2]) A ne pas confondre avec celles qui sont ouvertes seulement du côté du feu, dans un but tout différent (n° 981).

Cependant on y a renoncé en général, parce que le cuivre se corrodait aux alentours.

1094 — Dans le *fumivore Orvis* [1], deux souffleurs à vapeur sont disposés sur les faces latérales du foyer, protégés le mieux possible contre l'ardeur du feu (fig. 675, 676). Ils déterminent un

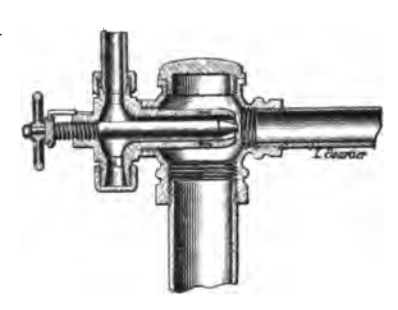


Fig. 675. — Fumivore Orvis. (Coupe longitudinale).

Fig, 676. — Fumivore Orvis. (Détail).

tirage énergique, que l'on règle suivant les besoins de la combustion.

Le *fumivore Wéry* [2] envoie dans la cheminée, au moyen d'un orifice en couronne, une injection d'air froid qui enveloppe comme une ceinture la masse gazeuse ascendante, et a pour effet d'amortir l'intensité du tirage (fig. 677, 678). On ne s'explique pas très bien l'utilité qu'il peut y avoir à restreindre la force vive, après s'être appliqué à la développer. Il est cependant juste d'ajouter que les résultats expérimentaux qui ont été obtenus méritent de fixer l'attention.

Dans l'*appareil de Holmes et Prideaux* [3], le registre du carneau

[1] *Génie civil*, t. VII, p. 395. — *Rapport de M. Walther-Meunier*, in-4°, 1886. — *La Nature*, 17 mai 1888, p. 253. — Hirsch et Debize. *Leçons sur les machines à vapeur*, t. I. p. 437. — *Scientific american*, 23 juin 1887, p. 387. — *Neuvième Congrès des Ingénieurs en chef des Associations de Propriétaires d'appareils à vapeur*, Paris, 1886, p. 33.

[2] Rapport de M. Pihet. *Bulletin de la Société d'Encouragement*, 3e série, t. XII p. 185.

[3] Hirsch et Debize. *Leçons sur les machines à vapeur*, t. I, p. 431. — Rankine. *Manuel de la machine à vapeur*. Traduction Richard, p. 276. — Ser. *Physique industrielle*, t. I, p. 429.

qui conduit à la cheminée, communique avec un mécanisme auto-

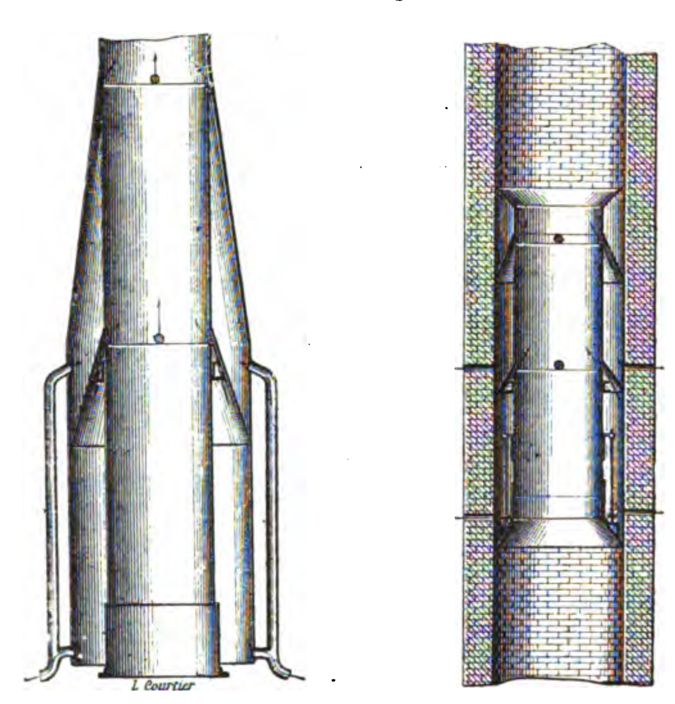


Fig. 677 et 678. — Fumivore Wéry (coupes verticales).

moteur qui s'ouvre en grand au moment du chargement, et se referme progressivement d'après la marche de la combustion.

§ 4

VENT FORCÉ

1095 — L'emploi du *tirage artificiel*, ou du *vent forcé* ([1]), tend à se répandre.

([1]) Demoulin. Note sur le tirage forcé et ses applications aux chaudières marines (*Mémoires de la Société des Ingénieurs civils*, mars 1890, p. 291). — Cornut. Consommations des chaudières forcées. *Sixième Congrès des Ingénieurs en chef des Associations de Propriétaires d'appareils à vapeur*, Paris, 1882, p. 96. — De Maupeou. *Mémoires du Génie maritime*, 1876. — Chancerel. *Mémoires de la Société des Ingénieurs civils*, 19 octobre 1880, p. 371. — Bertin. *Ibidem*, 3e série, t. IV, p. 531. — Loring. *Ibidem*,

Il est naturellement indiqué dans la marine, où manquent les hautes cheminées que l'on construit pour les usines fixes.

Il améliore la fumivorité.

Il permet d'obtenir plus de puissance avec une même surface de grille. Tant que la consommation ne dépasse pas 200 kilogrammes par mètre carré, on peut admettre que la pression croît proportionnellement à son carré.

Ce procédé facilite l'emploi de certains combustibles tels que l'anthracite. Il convient bien aux houilles grasses, mais il s'accommode mal des menus secs, non susceptibles de s'agglomérer.

Le vent forcé est à conseiller pour les générateurs qui présentent une proportion notable de surface de chauffe indirecte, à laquelle ce moyen rend de l'activité. Le type-locomotive s'y prête très bien; les chaudières tubulées, moins avantageusement en général. Cependant certains modèles de cette catégorie [1] ont été étudiés spécialement dans ce but, et font exception.

1096 — Cet artifice exige à la vérité une consommation spéciale de travail. Cependant on comprend qu'elle puisse s'allier avec l'économie, en permettant, à l'aide de moyens appropriés, de dépouiller les gaz chauds d'une partie de l'excédent de température nécessaire au tirage naturel; ce qui permettra d'employer ce supplément à fournir la quantité de vapeur indispensable pour produire artificiellement ce tirage, et en outre un excédent.

On ne doit pas se dissimuler cependant qu'il y a là une complication, sujette à des dérangements que ne présenterait pas l'emploi des cheminées.

mars 1886, p. 300. — Michel Perret. *Ibidem*, 21 mars 1890, p. 114. — Expériences de Tresca. *Annales du Conservatoire*. — *Les Mondes*, t. XLVIII, p. 524. — *Portefeuille économique des machines*, 1886, p. 28. — Bienaymé. *Les machines marines*, p. 467. — Ser. *Physique industrielle*, t. I, p. 542. — *Génie civil*, septembre 1885, p. 297.

Rowan. *Institute of Engineers and Shipbuilders in Scotland*, 1880. — James Patterson et Magnus Sandison. *Engineering*, 19 mars 1886, p. 284. — William Gedder Spence. *Ibidem*, 10 février 1888, p. 151. — Thomas Coper. *Ibidem*, 6 avril 1888, p. 350. — Système Howden (*Ibidem*, avril 1884, p. 313, 347; mai 1891, p. 551. — *Van Nostrand's Engineering Magazine*, 1884, p. 248). — *Mechanical progress*, 29 novembre 1890, p. 73. — *The Engineer*, 1877, p. 75; 17 janvier 1890, p. 53; 4 avril 1890, p. 281; 28 juin 1890, p. 515; 10 octobre 1890, p. 295; 7 novembre 1890, p. 379; 6 février 1891, p. 104.

[1] Chaudières Du Temple, Thornycroft, etc.

Le vent forcé expose à la production de coups de feu et de chambres de vapeur. Il produit un encrassement plus rapide des grilles, par cela seul qu'il permet d'y passer plus de combustible dans un même temps.

1097 — On peut, pour sa réalisation, recourir à divers procédés.

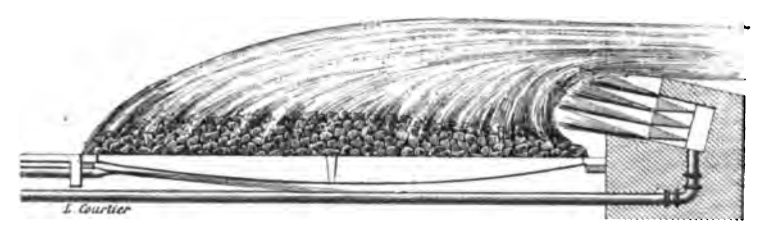


Fig. 679. — Souffleur Jones à injection de vapeur (coupe verticale).

Le premier consiste à envoyer à la base de la cheminée un jet de vapeur en ceinture, à l'aide d'un tuyau annulaire percé de trous. Ce mode d'utilisation de la vapeur a peu d'efficacité ([1]), et présente en particulier pour la marine l'inconvénient de perdre la quantité correspondante d'eau distillée (fig. 679, 680).

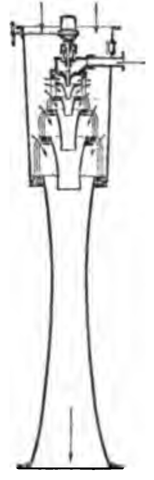


Fig. 680. — Souffleur sous-grille Kœrting. (Coupe méridienne).

Un second système consiste dans l'emploi de ventilateurs mécaniques, que l'on pousse jusqu'à 1 000 tours par minute, et même plus.

Citons enfin le *tirage en vase clos*. Les hommes sont alors enfermés dans la chambre de chauffe, où l'on développe une pression supérieure de quelques centimètres d'eau à celle de l'extérieur. Ce mode est surtout usité pour les torpilleurs et les grands navires de guerre. Le précédent l'est de préférence dans des installations ordinaires. Un tel emprisonnement laisse quelque appréhension aux chauffeurs; et il serait en effet de

([1]) Péclet. *Traité de la chaleur*, t. I, p. 392.

nature à entraîner une certaine aggravation des conséquences d'un accident. Il complique le service, et nécessite des précautions spéciales pour l'étanchéité. Il produit une forte vague d'air au moment où l'on ouvre la porte (¹). Celle-ci détermine un refroidissement de la boîte à feu, une altération du rendement, et présente l'inconvénient de faire jouer les tôles, au grand détriment de leur conservation. En revanche le système du vase clos améliore pour les chauffeurs les conditions de la ventilation, et il les garantit contre le retour en arrière des produits de la combustion.

§ 5

TROU D'HOMME

1098 — On appelle *trou d'homme* une ouverture oblongue pratiquée dans le corps cylindrique, et destinée à permettre l'entrée d'un ouvrier, en vue des nettoyages et des visites intérieures. Cet orifice doit dès lors présenter au moins 0 m. 40 de longueur sur 0 m. 25 de large. Il y aurait d'ailleurs inconvénient à en exagérer les dimensions ; car un tel vide constitue un notable affaiblissement de la virole dans laquelle il se trouve pratiqué. Aussi les bords de la plaie (²) doivent-ils être consolidés de manière à prévenir les déformations. On y rattache un court cylindre, dont les génératrices sont perpendiculaires aux premières, et qui porte sur sa section horizontale le couvercle obturateur.

1099 — Cette fermeture peut être opérée de deux manières différentes (fig. 681, 682).

La plus usitée (³) est habituellement désignée sous le nom d'*auto-*

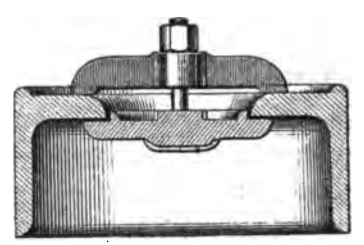
(¹) M. Schickau a combiné un dispositif dans lequel la manœuvre d'un seul levier suffit pour arrêter le vent avant d'ouvrir la porte (*Mémoires de la Société des Ingénieurs civils*, mars 1890, p. 303).

(²) Épure de l'intersection d'un cylindre de révolution et d'un cylindre elliptique, dont les génératrices sont respectivement perpendiculaires.

(³) Schmidt. Disposition facilitant la mise en place des portes autoclaves sans se blesser. *Treizième Congrès des Ingénieurs en chef des Associations de propriétaires d'appareils à vapeur*, Lyon, 1889, p. 161.

clave. Cette dénomination exprime que le couvercle est pressé contre son siège de dedans en dehors, de manière à comprimer les fuites d'autant plus que la tendance à la filtration devient elle-même plus énergique. On a soin d'interposer dans les joints une matière plastique. Des repères servent à faciliter la mise en place sans hésitation.

Le bouchon est en fonte, ainsi que son siège. On l'introduit dans l'intérieur, en présentant son petit axe suivant le grand axe de l'ouverture; puis on le fait basculer, et on le ramène en arrière pour l'appliquer contre l'orifice. Des boulons venus de fonte avec ce couvercle passent à travers des *étriers* ou *ponts* jetés en arc pardessus le vide. On serre à fond les écrous qui les assujettissent à ces derniers.



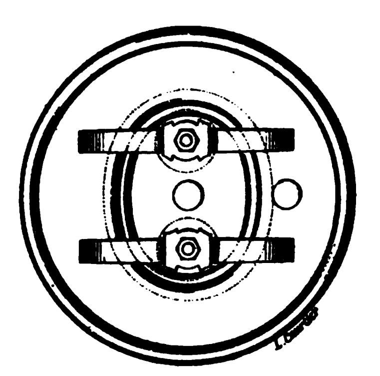


Fig. 681 et 682. — Trou d'homme. (Plan et coupe).

1100 — Le second mode de fermeture n'est plus autoclave. Le couvercle repose sur son siège par l'extérieur. Les écrous sont enfilés sur des tiges venues de fonte avec ce siège, et on les serre à force. Ils ont donc à supporter tout l'effort, ce qui constitue évidemment des conditions moins sûres que les précédentes (¹). Lorsqu'une fente se déclare, le chauffeur n'y peut porter remède qu'en serrant les vis. Si alors une rupture vient à se produire, la charge se reporte sur les autres écrous, et ce supplément de fatigue risque de les briser eux-mêmes en provoquant un désastre.

Comme compensation à ces inconvénients, il est juste d'ajouter

(¹) Polonceau et Olry. Note sur les dangers de l'emploi de boulons à charnières pour maintenir les obturateurs amovibles de certains récipients de vapeur. *Annales des mines*, janvier-février 1891.

que la manœuvre se trouve beaucoup simplifiée; considération qui a sa valeur, si ces opérations doivent se répéter fréquemment.

§ 6

PRISE DE VAPEUR

1101 — Afin d'éloigner le plus possible de la surface liquide le point où sera puisée la vapeur, et de diminuer ainsi le primage, on surmonte souvent le corps cylindrique d'un *dôme de vapeur*. Pour le même motif, il est bon, si rien ne s'y oppose, de placer ce dernier au point le plus éloigné du coup de feu, qui provoque l'ébullition la plus tumultueuse.

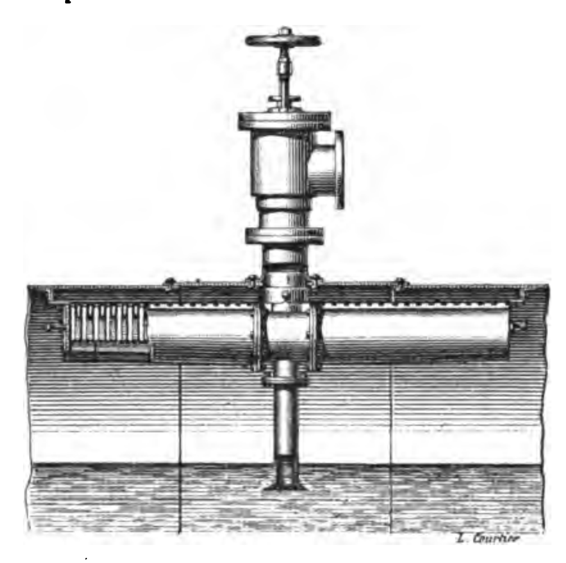


Fig. 683. — Prise de vapeur Mac-Dougall (élévation).

Ce dôme est formé d'un cylindre en tôle, disposé comme celui du trou d'homme, mais beaucoup plus long. Il est raccordé au corps cylindrique au moyen d'une cornière, ou d'une collerette emboutie ([1]). Il se termine par une tête en fonte, munie de portées où

([1]) Assemblage des dômes de vapeur. *Portefeuille économique des machines*, 3e série, t. IX, p. 136

l'on installe le trou d'homme, une soupape de sûreté, etc., suivant les circonstances. Si le trou d'homme en est distinct, on a la ressource, pour moins affaiblir la chaudière, de faire communiquer celle-ci avec la chambre de vapeur par une ouverture moindre que la section du dôme, et même par une série de trous de petit diamètre.

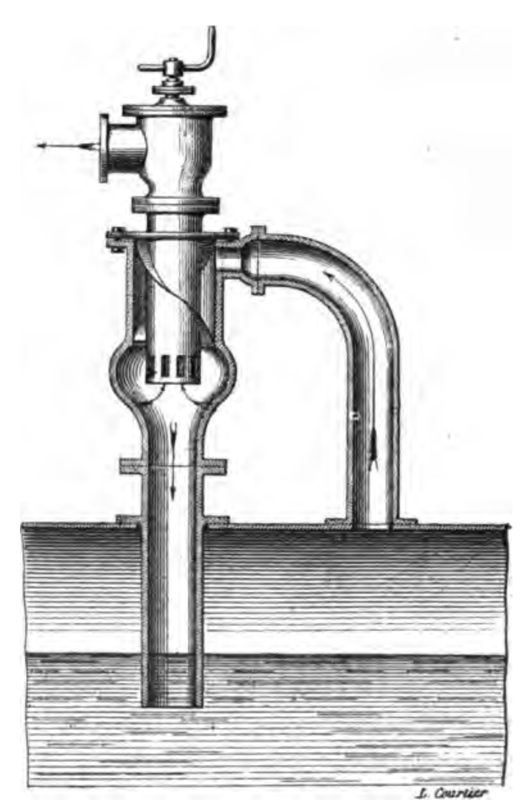


Fig. 681. — Prise de vapeur hélicoïdale Stockley (coupe verticale).

Pour éviter les coups d'eau que pourrait provoquer une ouverture trop brusque du régulateur, on a proposé (¹) de diviser cette chambre en deux compartiments par un diaphragme percé de trous.

1102 — Le tuyau de prise de vapeur débouche au sommet du dôme. Il descend dans le corps cylindrique, et le traverse dans toute

(¹) Lawson. *Van Nostrand's Engineering Magazine*, novembre 1884.

sa longueur, pour passer au-dessus du coup de feu, et sécher la vapeur dans cette région où règne la température la plus élevée. On emploie également pour le même objet des sécheurs proprement dits (n° 1107).

Avec le système Crampton (fig. 683), un tuyau règne dans la longueur de la chaudière à sa partie la plus élevée. Il est percé de trous sur sa génératrice supérieure, et c'est par là que s'introduit la vapeur, à l'abri des projections d'eau qui proviennent de l'ébullition.

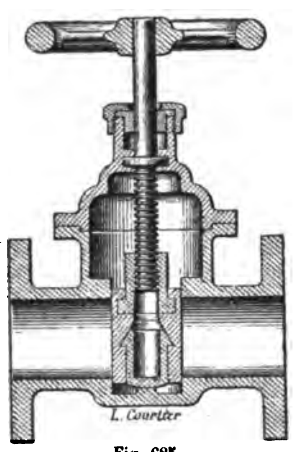


Fig. 685.
Robinet de prise de vapeur Peet.
(Coupe verticale).

Des moyens mécaniques sont également mis en œuvre [1] pour séparer l'eau mélangée à la vapeur. L'un des plus efficaces consiste dans l'intervention de la force centrifuge [2]. Il suffit à cet effet d'obliger le courant à circuler dans des courbes de faible rayon, comme dans la prise de vapeur Stockley qui est disposée en hélice (fig. 684), ou dans le collecteur Belleville muni de chicanes (fig. 646). La force centrifuge étant proportionnelle à la masse, agit moins énergiquement sur la vapeur, qui continue dès lors sa route, que sur les gouttelettes liquides qui sont précipitées sur les parois.

1103 — Un obturateur permet d'interrompre à volonté le courant (fig. 685). On emploie à cet effet des tiroirs, des robinets ou des soupapes [3]. Ces organes doivent être très soignés. Ils risque-

(1) Prises de vapeur : Bromulger. *Revue technique de l'Exposition de* 1889, 6e partie, t. I, p. 323. — Colombier. *Bulletin technologique de la Société des anciens Élèves des Écoles d'arts et métiers*, janvier 1887, p. 36. — Dupuch (*Revue industrielle*, 25 avril 1883, p. 161, — Ser. *Physique industrielle*, t. II, p. 195). — Escher Wyss. *Revue industrielle*, 1880, p. 313. — Le Van. *Journal of Franklin Institute*, 1880, p. 313. — Nash. *Revue industrielle*, 1880, p. 193. — Piat. Ser. *Physique industrielle*, t. II, p. 196.

(2) Séparateur centrifuge de vapeur et d'eau. *The engineering and mining journal*, 7 juin 1890, p. 640.

(3) Obturateurs : Châtel, Dupuch, *à jalousie*, Lethuillier-Pinel, Mallinson, *Peet-valve*, Sellers (Hirsch et Debize. *Leçons sur les machines à vapeur*, t. I, p. 705 à 716).

raient sans cela de gripper par le jeu des dilatations, ou de livrer passage à des fuites, qui ne tarderaient pas à corroder le métal en aggravant le mal.

§ 7

DÉTENDEURS

1104 — Dans certaines circonstances, on a intérêt à produire la vapeur à une pression notablement plus élevée que celle que l'on veut utiliser directement dans le cylindre. D'autres fois on s'attend, pour la vaporisation, à des irrégularités que l'on veut épargner au moteur. On interpose alors un *détendeur* sur le parcours du courant. Les dispositifs les plus variés [1] ont été imaginés dans ce but. Je me bornerai à décrire ici celui que M. Wenger emploie dans ses freins à air, et qui est un des plus simples. Je raisonnerai d'ailleurs comme pour une chaudière à vapeur.

Deux tubulures horizontales (fig. 686) établissent la relation avec la chaudière, à gauche, et avec la machine, à droite. Un clapet

[1] Détendeurs : ALLEN. *American machinist*, 31 décembre 1881, p. 7. — D'ARSONVAL. *La Nature*, 12 février 1881, p. 164. — BELLEVILLE (Hirsch et Debize. *Leçons sur les machines à vapeur*, t. I, p. 616. — Ser. *Physique industrielle*, t. II, p. 205). — COIGNET. *Les Mondes*, t. XLI, p. 113. — DAVIS. *American machinist*, 2 avril 1887, p. 5. — EHLERS. Ser. *Physique industrielle*, t. II, p. 208. — ESCHER WYSS. *Revue industrielle*, 11 août 1880, p. 313. — GENESTE et HERSCHER. Ser. *Physique industrielle*, t. II, p. 202. — GIGNET. *Revue industrielle*, 7 octobre 1886, p. 496. — GIROUD (*Bulletin de la Société industrielle de Mulhouse*, août 1886, p. 301. — *Annales industrielles*, 1883, t. I, p. 70. — *Portefeuille économique des machines*, 1881, p. 121). — GROSSEMEYER. *Revue industrielle*, 30 mars 1881, p. 122. — HAND. *American machinist*, 18 février 1882, p. 2. — HOLT. *Iron*, 3 décembre 1880, p. 417. — KUPP. *Revue industrielle*, 1881, p. 513. — LEGAT (*Portefeuille économique des machines*, 1879, pl. 17. — *Revue technique de l'Exposition de* 1889, 6e partie, t. I, p. 335. — *Troisième Congrès des Ingénieurs en chef des Associations de Propriétaires d'appareils à vapeur*, 1880). — LEMOINE. *Congrès de Lille de l'Association française pour l'avancement des sciences*. — LENCAUCHEZ et DURANT. (*Revue industrielle*, 12 avril 1890, p. 144. — *Exposition de* 1889. *Compagnie du Chemin de fer d'Orléans*, in-4°). — MAISON. Hirsch et Debize. *Leçons sur les machines à vapeur*, t. I, p. 802. — MASON. *American machinist*, 13 novembre 1886, p. 7. — DE NAEYER. Ser. *Physique industrielle*, t. II, p. 207. — NASH. *Revue industrielle*, 19 mai 1880, p. 193. — ROLLAND. *Annales des mines*, 1865, 2e sem., p. 461. — ROSS. *American machinist*, 11 mars 1882, p. 2. — VINÇOTTE. Ser. *Physique industrielle*, t. II, p. 207.

Annales des mines, 1866, 1er sem., p. 512. — *Bulletin de la Société d'encouragement*, 1871, p. 53.

interrompt la communication. Au-dessous de lui, un piston engagé dans un cylindre vertical supporte sur sa face supérieure la pression détendue, qui lui est transmise par un canal spécial. Il est soutenu en dessous par un ressort antagoniste, dont on peut d'ailleurs régler à volonté la raideur à l'aide d'une clef.

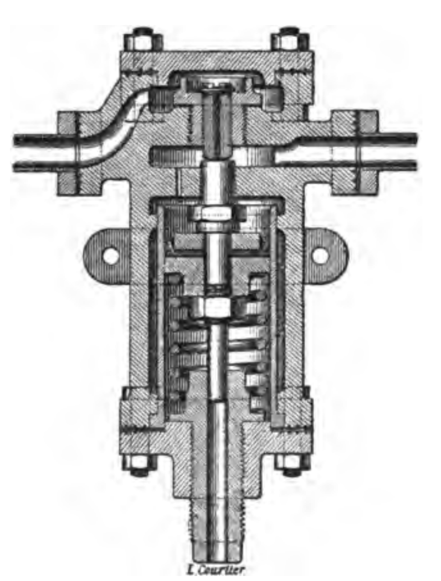


Fig. 686. — Détendeur Wenger (coupe verticale).

Lorsque, dans le canal de droite, la tension faiblit au-dessous du degré voulu, sous les appels du moteur, le ressort l'emporte, soulève le piston, et avec lui le clapet. Le courant passe, mais seulement à cette condition. On ne risque donc pas d'envoyer dans la machine de la vapeur à une tension plus élevée qu'on ne le veut.

Toutefois cette constance n'est qu'approximative. En effet nous négligeons dans ce raisonnement les variations que subit la force du ressort suivant son état de compression, et en outre l'effort exercé par la pression de la chaudière sur la tête du clapet, laquelle peut être variable d'après l'hypothèse. On a soin de donner une surface notablement plus grande au piston qu'au clapet, afin d'atténuer cette cause d'erreur.

1105 — La sensibilité d'un détendeur s'accuse d'autant plus que, pour un même écart de pression, la section offerte à l'écoulement est plus grande. Cette sensibilité constitue une qualité utile; cependant elle ne doit pas tomber dans l'exagération, et dégénérer en une sorte d'affolement. Une certaine mesure reste ici nécessaire, comme dans la question des régulateurs de vitesse [1].

[1] Voy. p. 465.

1106 — Le jeu des divers organes a besoin d'être très aisé. Mais il est difficile de concilier cette condition avec celle de l'étanchéité. De là une conséquence importante.

Si le moteur reste à l'arrêt pendant un certain temps, la filtration de la vapeur autour du clapet tend à rétablir des deux côtés l'équilibre de pression. On peut arriver ainsi à développer en aval une tension égale à celle de la chaudière, dans une région de la tuyauterie qui a été établie en vue d'une pression moindre. Il pourrait en résulter un accident.

Il est bon, pour ce motif, de placer dans cette partie une soupape de sûreté, destinée à limiter la tension au degré que l'on n'y veut pas dépasser.

§ 8

SÉCHEURS DE VAPEUR

1107 — On confond fréquemment dans l'usage les expressions de *sécheur* et de *surchauffeur* de vapeur. Il conviendrait cependant de restreindre ces dénominations à leur signification propre.

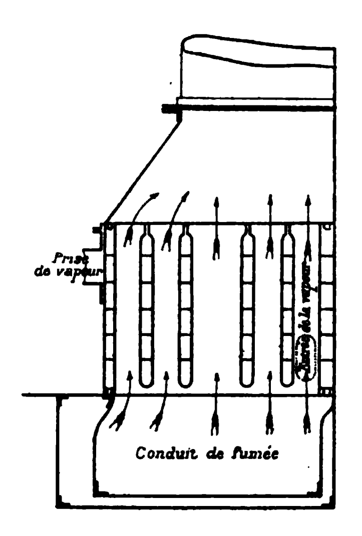
Le *surchauffeur* est destiné à éloigner la vapeur de son point de saturation, en vue de lui communiquer des propriétés spéciales, sur lesquelles nous n'avons pas à revenir en ce moment [1]. Pour obtenir ce but, il est nécessaire d'employer le contact de gaz encore assez chauds. Celui de la vapeur n'y saurait évidemment suffire. Cependant on n'établira pas l'appareil près du foyer, attendu que le métal risquerait de rougir, n'étant plus défendu par la présence de l'eau dans l'intérieur.

Les *sécheurs* ont simplement pour but de réduire, ou même de supprimer le primage (n° 1102). On leur affecte des gaz encore moins chauds que dans le cas précédent, et même l'atmosphère de vapeur de la chaudière, en faisant régner, à l'intérieur de cette dernière, un serpentin dans la région du coup de feu.

Les dispositifs sont assez variables dans la forme [2], mais très

[1] Voy. t. I, p. 851.
[2] Sécheurs de vapeur : Fillers. *Annales industrielles*, 1883, t. II, p. 151. — Hussey.

rapprochés en principe (fig. 687, 688). Ils consistent toujours en un jeu de tuyaux, que parcourt la vapeur au sein de l'atmosphère chaude. Leur superficie totale sera d'autant plus étendue que la température aura été plus atténuée. Cependant elle n'excède guère le quart de la surface de chauffe.



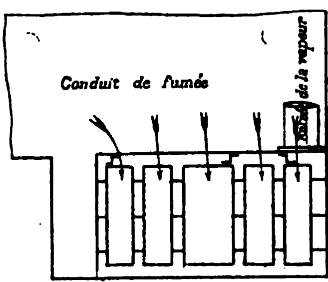


Fig. 687 et 688. — Sécheur de vapeur. (Coupes schématiques verticale et horizontale).

Dans le surchauffeur Uhler [1], on a introduit un foyer spécial qui permet de rendre le système commun à plusieurs chaudières, et plus indépendant de leur fonctionnement, quand on veut obtenir avec netteté la surchauffe. L'appareil comprend une caisse en fonte, au-dessous de laquelle est suspendu un jeu de tubes. Un foyer à grille ordinaire est construit en briques avec une enveloppe de tôle, et entre les deux se trouve une certaine épaisseur de cendres pour éviter la déperdition du calorique. Un système de robinets permet d'admettre la vapeur des différents générateurs, ou de les isoler à volonté les uns des autres.

American machinist, 7 juillet 1883, p. 1, — HYDER et WIGFULL. *Mechanical progress*, 28 février 1889, p. 19. — PETITPIERRE. Expériences de Tresca. *Annales du Conservatoire*, 30 septembre 1868. — RAFFARD. *Génie civil*, 22 novembre 1890, p. 58. — RYCKE. *American machinist*, 17 juillet 1890, p. 3. — SCHŒFFER et WALCKER. *Revue industrielle*, 4 avril 1883, p. 136. — WYATT. Cavelier de Cuverville. *Les Surchauffeurs*, in-8°.

[1] *Revue industrielle*, 2 mai 1891, p. 174. — *Génie civil*, 2 octobre 1891, p. 419. — *Bulletin technologique de la Société des anciens Élèves des Écoles d'arts et métiers*, janvier 1892.

§ 9

RÉCHAUFFEURS D'EAU D'ALIMENTATION

1108 — Nous avons déjà insisté (n° 1003) sur l'opportunité de refuser le nom de bouilleur aux appareils qui sont destinés à échauffer progressivement l'eau d'alimentation, avant son admission dans la chaudière proprement dite. En Allemagne, on a introduit la dénomination assez bien choisie de *avant-chauffeur*. Nous adopterons ici, comme plus conforme à l'usage, celle de réchauffeur (¹).

L'opération dont il vient d'être question réalise un triple avantage : 1° Elle a pour résultat de régulariser le régime intérieur de la chaudière, en évitant les coups de froid que produit l'alimentation directe. 2° On précipite ainsi d'avance (n° 1137) une partie des sels calcaires (²), dans une enceinte trop peu chauffée pour qu'ils puissent y former une couche pierreuse calcinée. Ils restent à l'état de boue, et l'on s'en débarrasse facilement à l'aide de purges périodiques. 3° On utilise de cette manière une certaine quantité de calories, qui sans cela seraient emportées par les gaz. Il est en effet difficile, en dehors de l'emploi des réchauffeurs, d'abaisser la température au-dessous de 250 degrés. Cette réalisation de la circulation méthodique procure donc un avantage direct. On en est quitte alors pour venir en aide au tirage en offrant de grandes sections à tous les passages, et en les ramonant plus souvent. En raison de la faible

(¹) Cornut (*Étude sur les réchauffeurs*, Lille, 1888. — *Formation de vapeur dans les réchauffeurs*, autographié, Lille, 1882). — Bour. Note sur l'installation des réchauffeurs. *Annales de la Société des sciences industrielles de Lyon*, 1881, p. 145. — Réchauffeur marin d'alimentation. *Génie civil*, t. XIV, p. 181. — Walther-Meunier. Construction rationnelle des bouilleurs réchauffeurs. *Sixième Congrès des Ingénieurs en chef des Associations de Propriétaires d'appareils à vapeur*, Paris, 1882, p. 61. — Ducos. Installation de réchauffeurs, *Ibidem*, p. 68. — Sauvage. *Annales des mines*, 8ᵉ série, t. XVIII, p. 431. — Burnat. *Bulletin de la Société industrielle de Mulhouse*, 1875, p. 138. — *Compte rendu mensuel des séances de la Société de l'industrie minérale de Saint-Étienne*, 1881, p. 160. — *Engineering*, 2 mai 1890, p. 527. — *The Engineer*, 24 octobre 1890, p. 339; 3 avril 1891, p. 205; 3 juillet 1891, p. 11.

(²) Les gaz dissous se dégagent également de suite. De là une cause assez active de corrosion de la partie supérieure des réchauffeurs par l'oxygène et l'acide carbonique, sous l'influence de la chaleur et de l'humidité.

température du milieu gazeux, il faut donner aux récipients une grande surface de chauffe : jusqu'à une fois et demie celle du générateur proprement dit.

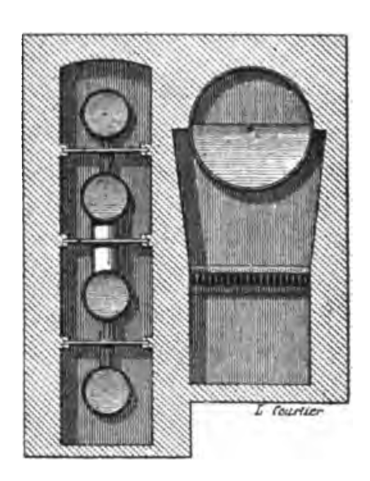


Fig. 689. — Chaudière Farcot à réchauffeurs latéraux (coupe verticale).

1109 — On peut adopter pour la construction de ces appareils deux types fondamentaux [1].

[1] Réchauffeurs d'eau d'alimentation : Babcok et Wilcox. Ser. *Physique industrielle*, t. II, p. 111 (fig. 691). — Berryman. Chabaud. *Bulletin de la Société de l'industrie minérale de Saint-Étienne*, 2e série, t. III, p. 136. — Biolley. *Génie civil*, 23 juin 1888, p. 124. — Booth. *American machinist*, 6 août 1891, p. 5. — Chevalet (*Revue industrielle*, 21 septembre 1889, p. 375. — *Journal des usines à gaz*, 1889, p. 287). — Dollfuss-Mieg. Hirsch et Debize. *Leçons sur les machines à vapeur*, atlas, pl. XIII, fig. 8, 9, 10. — Fromentin. *Revue industrielle*, 19 novembre 1885. — Gonberg. *American machinist*, 16 janvier 1886. — Gosling. *Ibidem*, 16 octobre 1890. — Hatk. *Ibidem*, 19 février 1881, p. 8. — Hoppes (*Ibidem*, 17 avril 1886, p. 8. — *Scientific american*, 24 mars 1883, p. 179). — Johnson et Allan. *The Engineer*, 22 octobre 1875, p. 282. — Kirkaldy. *Revue industrielle*, 26 septembre 1891, p. 381. — Lowcock. *American Journal of Railway Appliances*, 14 juin 1884, p. 306. — Mac-Lame. *Génie civil*, 19 janvier 1889, p. 185. — Mahony. *American machinist*, 17 janvier 1885, p. 5. — Marchant. *Engineering*, 18 août 1876. — De Naeyer. Ser. *Physique industrielle*, t. II, p. 110. — Northcote. *Engineering*, 1876, 160. — Otis. *American machinist*, 11 décembre 1886, p. 7. — Parkinson. *Mechanical Progress*, 21 avril 1888, p. 155. — Reynold. *American machinist*, 22 mai 1886. — Richardson. *Ibidem*, 22 janvier 1887, p. 4. — Root. Ser. *Physique industrielle*, t. II, p. 111. — Scherwin. *Engineering*, 31 janvier 1890, p. 127. — Strong. *Journal of Franklin Institute*, novembre 1882, p. 321. — Sulzer. Hirsch. *Rapport sur l'Exposition de* 1878, p. 104. — Thorilleux. *Écho des mines et de la métallurgie*, 1876, p. 197. — Twibill. Hirsch. *Rapport sur l'Exposition de* 1878, p. 1 3. — Vinton. *American Journal of Railway Appliances*, 15 mai 1884, p. 244. — Vivet. *Revue industrielle*, 30 juillet 1879,

Le plus ordinaire consiste dans l'emploi de corps cylindriques horizontaux de diamètre réduit, mais suffisant cependant pour éviter l'encombrement par les dépôts, et pour comporter des visites intérieures (fig. 689, 690). On les munit à cet effet de trous d'homme à leurs deux extrémités. On les installe dans un compartiment latéral, en leur donnant une légère inclinaison pour faciliter

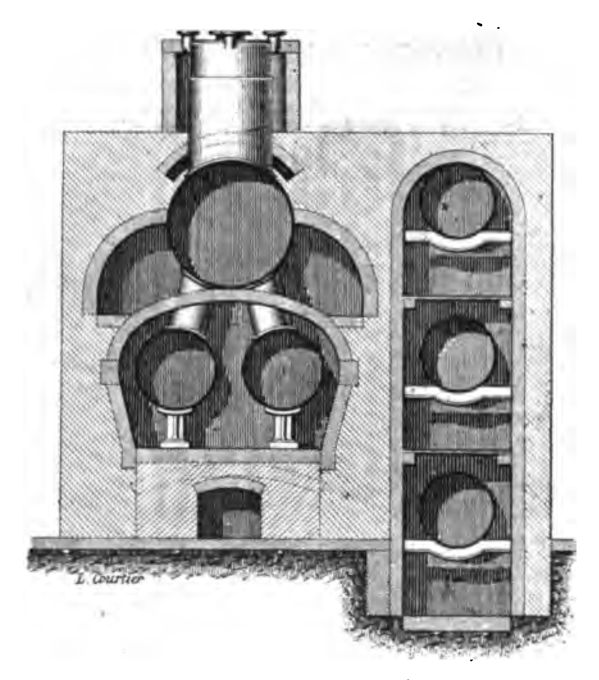


Fig. 690. — Chaudière à deux bouilleurs et à trois réchauffeurs (coupe verticale).

le dégagement des bulles, et prévenir la formation des chambres de vapeur.

1110 — Un dispositif tout différent est connu sous le nom d'*economizer*. Au lieu de gros cylindres en tôle, coûteux, encombrants, et rapidement corrodés, on se sert de tubes en fonte, qui résistent plus longtemps à l'oxydation.

p. 296. — Warner. *The american Engineer*, 24 décembre 1885, p. 275. — Willinbrinck. *Scientific american*, 10 août 1889, p. 89.

Dans l'economizer Green (1), les tuyaux sont en fer forgé (fig. 691), de $0^m,12$ de diamètre extérieur et de $2^m,65$ de longueur. Ces organes sont verticaux, et réunis à leurs extrémités (2) par des caisses en fonte, à l'aide de joints coniques forcés à la presse hydraulique. La caisse du bas fournit l'eau froide. Celle de la partie supérieure déverse son eau chaude dans un collecteur, où elle arrive à la tem-

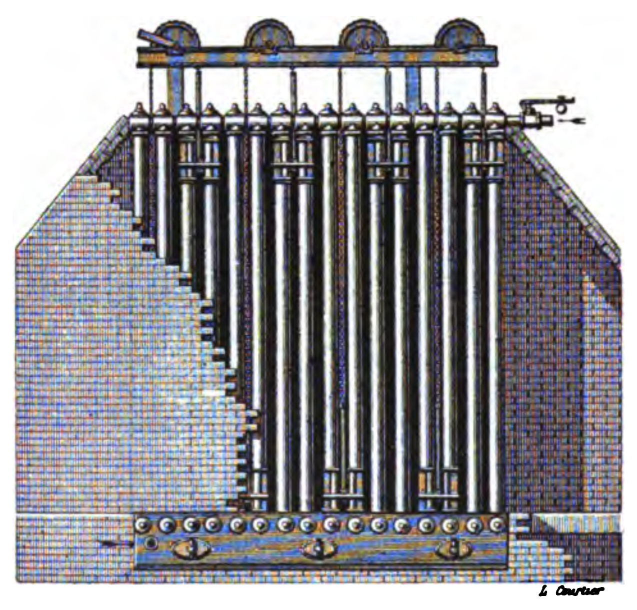


Fig. 691. — Economizer Babcock et Wilcox (élévation).

pérature de 150 degrés. L'ensemble est renfermé dans une chambre en briques qui reçoit les gaz par le haut.

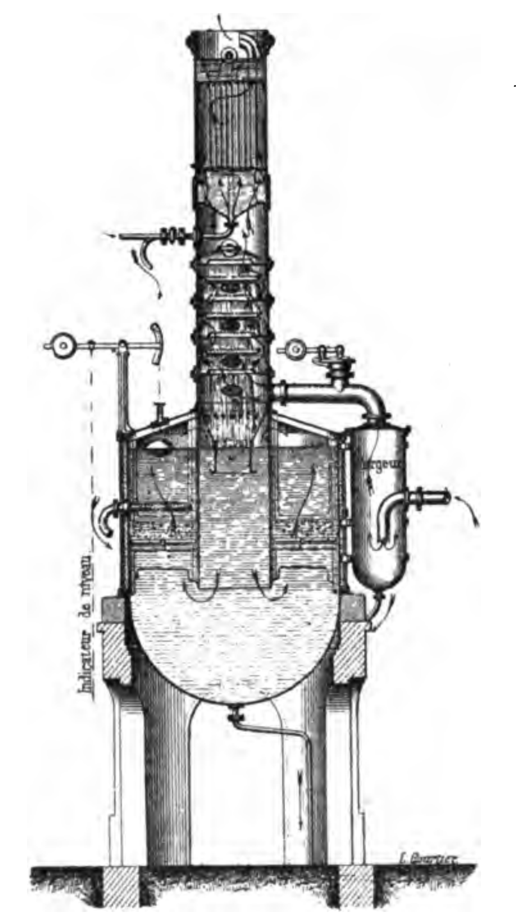
La suie se dépose en abondance sur les surfaces. On les décape à l'aide d'un racloir Graham, animé d'un mouvement longitudinal de va-et-vient. Les nettoyages de la chambre ont lieu chaque semaine. Ce nettoyage est indispensable, tant pour assurer la transmission de la chaleur, que pour éviter la condensation dans les suies de vapeurs sulfuriques qui corroderaient le métal.

(1) Hirsch. *Rapport sur l'Exposition de* 1878, p. 103. — Ser. *Physique industrielle*, t. II, p. 112.

(2) Une association consécutive en serpentin exposerait au danger de la formation de chambres de vapeur aux points maxima des cols supérieurs.

1111 — Certains réchauffeurs sont fondés sur le principe de la condensation de la vapeur détendue, pour les machines qui n'ont pas de condenseur spécial. Cette liquéfaction peut avoir lieu par transmission du calorique à travers des parois métalliques, comme dans les condenseurs à surfaces (n° 1250), ou par mélange direct de la vapeur avec l'eau (¹).

Le premier mode présente l'avantage de préserver cette eau de la contamination par les matières grasses entraînées par la vapeur qui a fonctionné au sein de la machine. Dans le réchauffeur Lencauchez et Durant (fig. 692, 693), on a pris des mesures pour remédier à cet inconvénient (²), qui peut



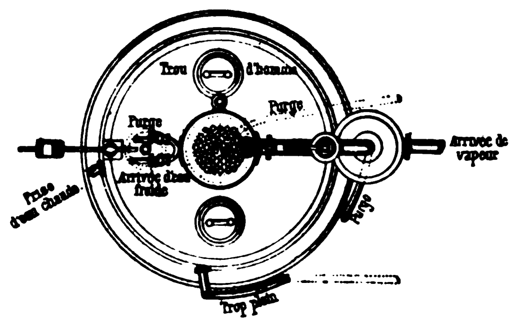


Fig. 692 et 693. — Réchauffeur d'alimentation Lencauchez. (Plan et coupe).

(¹) Échauffement de l'eau d'alimentation par la vapeur d'échappement. *Neuvme Congrès des Ingénieurs en chef des Associations de Propriétaires d'appareils à vapeur*, Paris, 1886, p. 138.

(²) *Bulletin de la Société d'encouragement*, oct. 1891,

entraîner pour les chaudières de graves conséquences (n° 1131).

1112 — On a construit quelquefois des réchauffeurs communs à plusieurs générateurs. A cet effet, un gros cylindre en tôle est placé dans le carneau général, dont il contribue à augmenter la section.

Ce système présente de grandes difficultés pour les nettoyages. Il faut, quand on veut y procéder, que toutes les chaudières soient éteintes ensemble, et depuis un temps assez long pour assurer le refroidissement. Il est d'ailleurs difficile de se procurer ainsi une grande surface de chauffe.

p. 558. — *Mémoires de la Société des Ingénieurs civils*, juin 1890. — *Annales industrielles*, 17 juillet 1881, p. 84. — *Bulletin de la Société de l'industrie minérale de Saint-Étienne*, 2e série, t. X, p. 549. *Comptes rendus mensuels des séances de la Société de l'industrie minérale de Saint-Étienne*, 1881, p. 217.

CHAPITRE LIX

ALIMENTATION

—

§ 1

APPAREILS D'ALIMENTATION

1113 — *Généralités.* — L'eau d'alimentation est admise dans le générateur en un lieu éloigné du coup de feu, pour mieux ménager la continuité des températures. La tubulure d'admission est munie d'une pomme percée de trous, afin de disséminer le courant dans toutes les directions, en évitant de concentrer le refroidissement sur un point déterminé. Cet organe est exposé à s'entartrer. Il doit rester possible de le détacher pour le nettoyer.

1114 — L'intérieur du générateur se trouvant soumis à une tension supérieure à celle de l'atmosphère, l'introduction de l'eau nécessaire pour réparer ses pertes ne saurait avoir lieu sans une dépense spéciale de travail. Mais celle-ci est proportionnellement très faible.

En effet l'introduction de l'unité de volume, c'est-à-dire d'un mètre cube, malgré la pression effective de N kilogrammes par centimètre carré, exigera théoriquement un travail égal au produit du volume et de la pression effective par unité de surface, c'est-à-dire 10 000 N. Pour chaque litre, ou kilogramme, on dépensera 1 000 fois moins ; à savoir pratiquement, en appelant en outre λ le rendement de l'appareil :

$$10\frac{N}{\lambda}.$$

Admettons que pour entretenir une puissance d'un cheval-heure, il faille dépenser 7 kilogrammes de vapeur, ce qui exigera une alimentation de 7 litres d'eau ; le travail à fournir deviendra :

$$70\,\frac{N}{\lambda}.$$

Mais cette unité de puissance dynamique correspond à un total de $75 \times 60 \times 60$ ou 270 000 kilogrammètres. La part *proportionnelle* à prélever pour l'alimentation aura donc pour valeur :

$$\frac{70\,N}{270\,000\,\lambda} = 0{,}00026\,\frac{N}{\lambda}.$$

Quand on emploie la pression hydrostatique (n° 1115), ou une bouteille alimentaire (n° 1118), λ reste très voisin de l'unité. Avec l'injecteur (n° 1119), ce coefficient peut dépasser $\frac{4}{5}$. Le cas le plus défavorable est celui de la pompe alimentaire (n° 1117). Nous pouvons alors admettre en nombre rond $\lambda = \frac{1}{2}$, ce qui donne :

$$0{,}00052\,N.$$

Supposons par exemple un timbre de 10 kilogrammes, chiffre très élevé pour une machine fixe, quoique inférieur à la pratique des chemins de fer. Il viendra finalement : 0,0052. C'est donc environ 1/2 % du travail de la machine que l'on devra distraire de son effet utile pour subvenir à son alimentation, ce qui constitue évidemment une fraction minime.

Ce travail peut être emprunté à des sources mécaniques ou calorifiques, statiques ou dynamiques. De là quatre moyens, distincts en principe, et très inégalement représentés dans la pratique :

1° Agent mécanique statique — *Pression hydrostatique* ;
2° Agent mécanique dynamique — *Pompe alimentaire* ;
3° Agent thermique statique — *Bouteille alimentaire* ;
4° Agent thermique dynamique — *Injecteur*.

Ces deux derniers conviennent seuls, avec le premier, pour les industries qui emploient des chaudières sans moteurs.

1115 — *Pression hydrostatique.* — Ce procédé n'est que rarement employé, en raison des conditions locales exceptionnelles qui sont nécessaires pour son intervention, à savoir une dénivellation d'un nombre de décamètres égal au timbre de la chaudière. Mais lorsque les circonstances topographiques s'y prêtent, il se recommande par sa gratuité, en dehors des frais de premier établissement et d'entretien matériel. La dépense proportionnelle au travail effectué disparaît en effet, puisque celui-ci est alors développé directement par la pesanteur.

Quelquefois, en écartant la considération de la gratuité, on a trouvé commode de faire travailler d'une manière continue une pompe élévatoire pour monter l'eau dans un réservoir supérieur, à l'aide duquel on alimente, d'une manière discontinue, aux instants voulus, par la manœuvre d'un simple robinet.

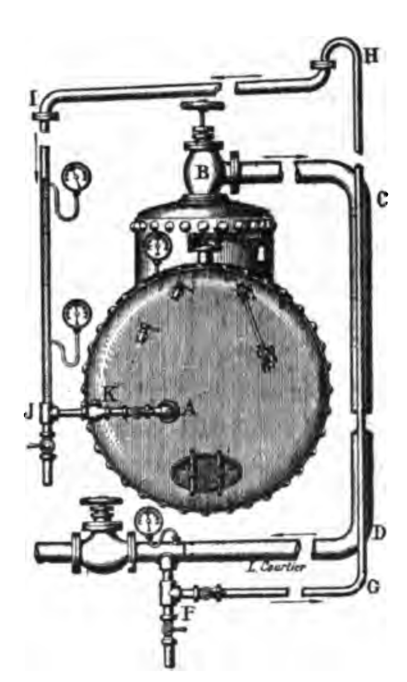


Fig. 694. — Steam-loop (élévation).

1116 — *Steam loop.* — On peut rattacher aux procédés d'alimentation fondés sur l'influence de la pression hydrostatique, le *steam loop* ou *boucle de vapeur*, appareil nouveau qui est destiné à résoudre le problème dans un cas particulier, à savoir le retour au générateur de l'eau de condensation qui se dépose dans les tuyauteries ou les chemises de vapeur [1].

[1] *Génie civil*, 27 février 1892, p. 275. — Sauvage. *Annales des mines*, 8e série, t. XX, p. 476. — *Engineering*, 1890, t. I, p. 712; II, 22.

La chaudière A (fig. 694) envoie le fluide par le tuyau BCDE pour accomplir le rôle que l'on attend de lui. L'eau de condensation se rassemble par son poids dans la portion FG du tube de retour. La pression la maintient dans le conduit GH à l'état d'émulsion traversée par la vapeur. La partie HI qu'on laisse à nu à dessein, tandis que tout le reste de la tuyauterie est soigneusement enveloppé, achève de liquéfier le mélange, qui s'écoule dans le tuyau IJK. En K se trouve un clapet de retenue, pour maintenir close la chaudière contre sa propre tension. Mais comme cette force élastique est sensiblement la même partout, et qu'il s'y ajoute en J, d'après le principe des vases communiquants, l'influence de la différence des densités des parties verticales, qui sont remplies d'eau en IJ et d'une émulsion plus légère en HG, cet excès suffit pour déterminer l'ouverture du clapet et la rentrée de l'eau, quand elle se trouve accumulée dans le tube JI en quantité suffisante.

1117 — *Pompe alimentaire.* — Avant l'invention de l'injecteur Giffard, le moyen classique d'alimentation était la *pompe alimentaire* (1). On l'appelle également *pompe à eau chaude*, quand elle puise dans la bâche du condenseur (2).

Cet engin ne présente rien d'absolument spécial. Il peut être à simple ou à double effet (fig. 695). Dans ce dernier cas, il renferme deux chapelles munies chacune d'un clapet. Ceux-ci s'ouvrent et se ferment alternativement sous l'action du piston (3).

Une surveillance active est nécessaire pour empêcher les conduits de s'entartrer. En pareil cas, on pourrait croire alimenter, d'après le jeu apparent des pièces, tandis que le débit serait devenu insuffisant; circonstance de nature à entraîner de graves conséquences.

(1) Pompes alimentaires : Belleville. Ser. *Physique industrielle*, t. II. p. 186. — Carré (fig. 695). *Chronique industrielle*, 7 mars 1886, p. 112. — Irving Fox. *American machinist*, 6 août 1881, p. 7. — Stappfer. Ser. *Physique industrielle*, t. II, p. 187. — Worthington. *Ibidem*.

(2) On la distingue par là de la *pompe à eau froide*, dont on prend la commande sur le moteur, quand l'eau froide d'alimentation doit être puisée à une certaine profondeur dans le sol.

(3) Dans la pompe Thirion (Ser. *Physique industrielle*, t. II, p. 187), le piston est à garniture de bois de noyer bouilli dans l'huile, avec fibres normales aux génératrices du cylindre.

Dans la pompe Buzelin, une soupape de sûreté crache et avertit, lorsque le clapet n'obéit pas. Un foret, que l'on tourne à la main, permet alors de détartrer le conduit.

Le volume d'une pompe alimentaire à *simple effet* est ordinairement égal à 0,006 de celui du cylindre à vapeur. La section des clapets n'était autrefois que le quart de celle du piston. On approche aujourd'hui de l'égalité. En revanche la levée, qui était alors égale au quart du diamètre, s'est abaissée au dixième, pour permettre une allure plus rapide.

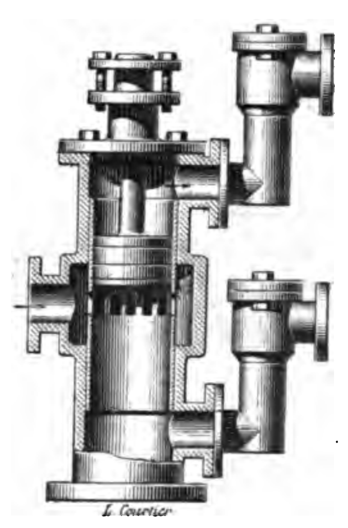


Fig. 695. — Pompe alimentaire Carré. (Coupe verticale).

La pompe alimentaire marche mal avec de l'eau trop chaude. L'espace engendré se remplit alors, non plus de liquide, mais de vapeur, sous l'influence du vide créé par le piston. En pareil cas, il convient de mettre la pompe en contrebas de la bâche, afin que la gravité vienne en aide au remplissage. On a soin également pour ce motif, quand on emploie des réchauffeurs spéciaux, de les placer sur le refoulement, et non sur l'aspiration de la pompe.

Si celle-ci doit puiser directement dans le condenseur, son exécution sera particulièrement soignée, puisque le vide qu'elle produit doit être alors au moins égal à celui de la pompe à air (n° 1240).

La pompe alimentaire fonctionne d'une manière continue ou discontinue. Dans le premier cas, à l'aide d'un robinet, on peut à volonté injecter le courant dans la chaudière, ou lui laisser faire retour dans la bâche à travers une soupape à ressort. Avec la seconde combinaison, c'est le mécanisme lui-même que l'on embraie. Ce dernier mode est plus clair que le premier, qui risque de prêter à la confusion, et qui est pourtant le plus répandu dans la pratique.

Ordinairement la commande est prise sur le moteur à l'aide d'un

embrayage. Cependant on emploie quelquefois un *petit cheval alimentaire* (¹), c'est-à-dire une machine distincte (fig. 696), d'un faible volume en raison du peu d'importance proportionnelle du travail à fournir (nº 1114). On trouve à cette disposition l'avantage de pouvoir alimenter sans mettre en marche le moteur proprement dit. Souvent le piston à vapeur du petit cheval et le piston hydraulique de la pompe sont, pour plus de simplicité, montés sur la même tige (²).

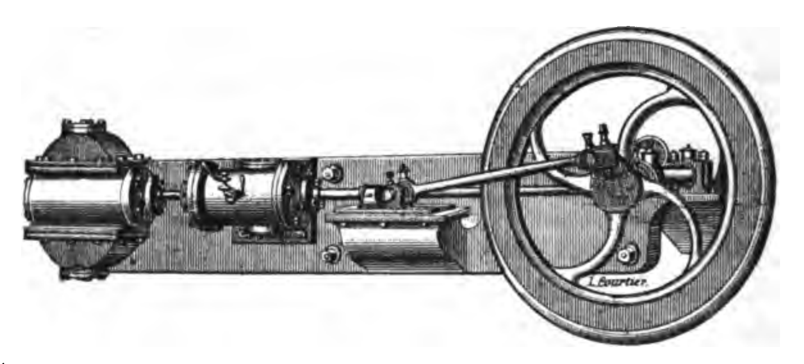


Fig. 696. — Petit cheval alimentaire Buffaud et Robatel (élévation).

1118 — *Bouteille alimentaire.* — L'appareil connu sous le nom de *bouteille alimentaire* (³) emploie l'énergie sous la forme calorifique, pour mettre l'eau d'alimentation dans des conditions qui permettent son entrée spontanée dans la chaudière.

Un récipient muni d'un tube indicateur de niveau destiné à guider la manœuvre (fig. 697), est percé de deux tubulures A et B, garnies chacune d'un robinet à trois voies. Les manettes de ces derniers sont manœuvrées d'un même mouvement à l'aide d'une seule poignée C. L'orifice A est surmonté d'un tube D, qui débouche dans une région assez élevée pour que l'eau ne l'atteigne jamais. Le robinet dont il est muni permet de le mettre en communication, soit avec la vapeur du générateur à l'aide du tuyau E, soit avec l'atmosphère extérieure par l'ajutage F. De même le robinet B

(¹) Cheval alimentaire Lecouteux et Garnier. *Revue technique de l'Exposition universelle de* 1889, 7ᵉ partie, 2ᵉ fascicule, p. 150.

(²) Haton de la Goupillière. *Cours d'exploitation des mines*, t. II, p. 297.

(³) *Bulletin de la Société d'encouragement*, 1850, p. 466.

met en relation le fond de la bouteille avec le réservoir d'eau d'alimentation situé en G, ou avec le fond de la chaudière à l'aide du conduit H.

En poussant la poignée d'un certain côté, l'on établit la relation du récipient avec F et G, en interceptant toute communication avec la chaudière. Dans ces conditions, l'eau descend par son poids dans la bouteille à travers le tuyau G, en expulsant l'air par le tube F. Ces deux ouvertures sont ensuite refermées par le mouvement inverse de C, et l'on ouvre au contraire D et H. La vapeur du générateur se précipite alors dans la bouteille par le canal D, et s'y condense en vertu du principe de la paroi froide, jusqu'à ce qu'elle ait amené le bain liquide à la température qui règne dans la chaudière. Comme il s'ensuit par cela même l'équilibre de pression, l'eau peut s'écouler librement dans cette dernière en vertu de la gravité, à travers le conduit H.

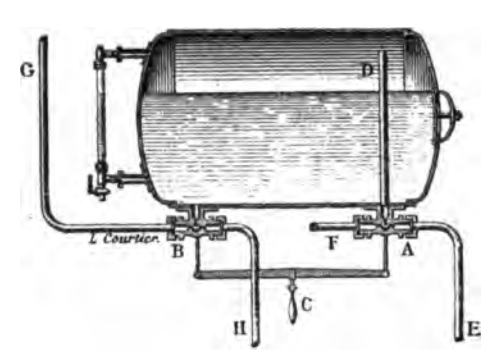


Fig. 697. — Bouteille alimentaire (coupe verticale).

Il est facile de voir qu'en dehors du faible travail développé par la pesanteur pendant la descente du liquide du bief extérieur dans la bouteille, et de celle-ci dans le générateur, la dépense principale d'énergie nécessaire pour vaincre l'obstacle de la pression se trouve précisément dans cette consommation de vapeur. Primitivement formé au prix de la combustion d'une quantité correspondante de charbon, ce fluide se trouve détruit par son passage dans la bouteille, de manière à exiger ultérieurement une nouvelle provision de combustible pour reprendre une seconde fois la forme gazeuse, après qu'il a fait retour dans la chaudière à l'état liquide, avec le bain additionnel qu'il a servi à y amener.

§ 2

INJECTEUR

1119 — *Description.* — L'injecteur Giffard ([1]) est une des plus brillantes conquêtes de la mécanique moderne (fig. 698). Cette

([1]) Henri Giffard. *Notice théorique et pratique sur l'injecteur automoteur*, Paris, 1860, chez Flaud. — Combes (Note sur l'injecteur automoteur des machines à vapeur nventé par M. Giffard. *Bulletin de la Société d'encouragement*, 1859, p. 337, 565. — *Annales des mines*, 5e série, t. XV, p. 169; XVII, 311, 321, 557; 6e série, t. I, p. 575. 606; IV, 517). — Résal (Recherches théoriques sur les effets mécaniques de l'injecteur Giffard. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. LIII, p. 632. — *Mécanique générale*, t. IV, p. 176. — *Annales des mines*, 1862, 1er sem., p. 575, 606). — Reech (*Théorie de l'injecteur automoteur des chaudières à vapeur de M. Giffard*, Mallet-Bachelier, 1860. — *Mémorial du Génie maritime*, 1858). — Deloy. Expériences sur l'injecteur automoteur de M. Giffard (*Annales des mines*, 1860, 1er sem., p. 301. — Rapport de Combes. *Bulletin de la Société d'encouragement*, 1861, p. 238). — Villiers. Résultats des expériences faites sur l'injecteur Giffard. *Ibidem*, 1861, p. 335. — Truchot. Expériences nouvelles sur l'injectéur Giffard. *La Nature*, 15 novembre 1879, p. 383. — Carvalho. Essai sur la théorie de l'injecteur Giffard. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. XLIX, p. 938. — *Mémoires de la Société des Ingénieurs civils*, 1860, p. 187. — Histoire d'une grande invention : l'injecteur Giffard. *La Nature*, 1er juillet 1882, p. 65. — Notice historique et pratique sur l'injecteur Giffard. *Annales des mines*, 1860. — Haerens. Théorie de l'injecteur Giffard. *Revue universelle des mines et de la métallurgie*, octobre 1885, p. 231.

G. Richard. Les injecteurs. *Revue générale des chemins de fer*, 1882, 2e sem., p. 200, 354; avec une bibliographie très étendue. — Ledieu (Sur le rendement des injecteurs à vapeur. *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, 1875, p. 711, 773, 1023. — *Nouvelles machines marines*, t. I, p. 524). — Félix de Romilly. Expériences sur l'entraînement de l'air par un jet gazeux. *Annales de la Société de chimie et de physique*. — Rapport de M. Haton de la Goupillière. *Bulletin de la Société d'encouragement*, 3e série, t. IV, p. 409. — Zeuner. Théorie mécanique de la chaleur. Traduction Cazin et Arnthal, p. 385. — Staffer. *Alimentation des chaudières marines à haute pression*, in-8°. — Callon. *Cours de machines*, t. I, p. 299, 405; III, 144. — Couche. *Voie, matériel roulant, exploitation technique des chemins de fer*, t. III, p. 179. — Hirsch et Debize. *Leçons sur les machines à vapeur*, t. I, p. 761. — Ser. *Physique industrielle*, t. I, p. 745: II, 174. — Collignon. *Mécanique*, t. II, p. 527. — Pochet. *Mécanique industrielle*. p. 285. — Bienaymé. *Les machines marines*, 517. — Richard et Baclé. *Manuel du mécanicien conducteur de locomotive*, p. 50, 54, 288. — Hirsch. *Rapport sur l'Exposition de* 1878, p. 12. — Sauvage. *Annales des mines*, novembre 1890, p. 195. — Rankine. *Manuel de la machine à vapeur*. Traduction Richard, p. 686.

John England. Giffard's injector. *Proceedings of the Institution of civil Engineers*, 1864, p. 65, et 14 février 1865. — Denton. On the distribution of energy in an injector. *American machinist*, 17 janvier 1889, p. 2. — Froude. On Giffard's Injector's. *British Association*, t. XXX. — Robinson. On Giffard's Boiler injector. *Institution of mechanical Engineers*, 1860.

Grashof. *Theoretischen Maschinenlehre*. — Hartmann. *Die Pumpen*.

invention a été reproduite par un grand nombre de constructeurs [1],

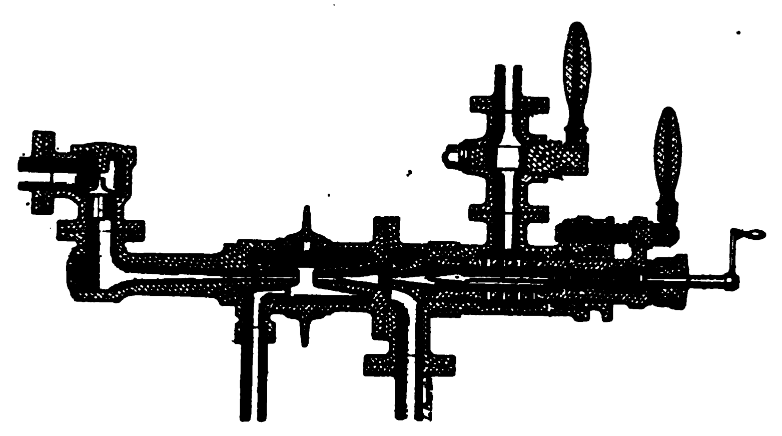


Fig. 698. — Injecteur Giffard (coupe longitudinale).

avec diverses modifications qui n'en ont pas altéré le caractère fondamental.

[1] Injecteurs : Barclay. *Practical mechanic's Journal*, 1865. — Borland. *American machinist*, 16 juin 1883, p. 4. — Bouvret (fig. 699). Richard. *La chaudière locomotive*, p. 391. — Colvin. *American Journal of Railway Appliances*, octobre 1884, p. 196. — Dulkin. *Annales industrielles*, 1884, t. I, p. 562. — Friedmann (*Manuel d'Heusinger von Waldegg*, t. III, p. 398. — Sauvage. *Annales des mines*, novembre 1890, p. 197). — Guyenet. *Revue technique de l'Exposition de* 1889, 6e partie, t. I, p. 356. — Hall. *American machinist*, 30 août 1884, p. 5. — Hallain et Stephend. *The Engineer*, 26 mai 1882. — Harner, Metcalfe et Davies (*Revue industrielle*, 21 février 1883, p. 73. — Ser. *Physique industrielle*, t. II, p. 182. — *Engineering*, 1er mai 1885, p. 470). — *Influx*. *Revue industrielle*, 28 mai 1884, p. 215. — Irwin. *Journal of Franklin Institute*, juin 1880, p. 386. — Juillemier. Richard. *La chaudière locomotive*, p. 391. — Klaser. *Revue universelle des mines et de la métallurgie*, t. XXV-XXVI, p. 413. — Krauss (Hirsch et Debize. *Leçons sur les machines à vapeur*, t. I, p. 704. — Richard. *La chaudière locomotive*, p. 400. — *Little giant*. *American machinist*, 30 mai 1889, p. 5. — Loftus Kinner. *Ibidem*, 3 décembre 1881. — Mack. *Railroad Gazette*, 4 avril 1882. — Maulove, Alliot et Fryer (*Revue industrielle*, 1883, p. 73. — *Portefeuille économique des machines*, 1884, p. 59). — Muller et Roger. *Revue technique de l'Exposition de* 1889, 6e partie, t. I, p. 328. — Nezeraux. *Bulletin technologique de la Société des anciens Élèves des Écoles d'arts et métiers*, octobre 1891, p. 750. — Pemberthy (*Revue industrielle*, 12 mai 1887, p. 186. — *Scientific american*, 26 février 1887, p. 132). — Polonceau (Ser. *Physique industrielle*, t. II, p. 180. — *Compagnie du chemin de fer d'Orléans*. *Exposition de* 1889, in-4°). — Rue. Stephen Roper. *Handbook of the locomotive*, p. 230. — Schæffer et Budenberg (*Génie civil*, t. XIX, p. 425. — Habets. *Revue universelle des mines et de la métallurgie*, t. XXXV, p. 27. — *The railway Engineer*, avril 1889, p. 109). — Sharp. Richard. *La chaudière locomotive*, p. 386. — Shau. *Manuel d'Heusinger von Waldegg*, t. III, p. 397. — Slater Slaville. *Proceedings of mechanical Engineers*, mai 1884, p. 167. — Thiry. *Chronique industrielle*, 2 janvier 1887, p. 3. — Turck. Hirsch et De-

Les tubes A et B (fig. 699) communiquent l'un et l'autre avec la chaudière. Dans l'état de repos, des pressions égales s'exerceraient donc sur les deux faces du clapet C, qui resterait par suite en équilibre. Au moment où l'on ouvre l'obturateur D, le contact de l'eau froide de la bâche qui communique avec le tuyau E détermine un degré de vide, et la vapeur se précipite par A. Une fois lancée, elle traverse le système convergent-divergent F, G, en crachant par

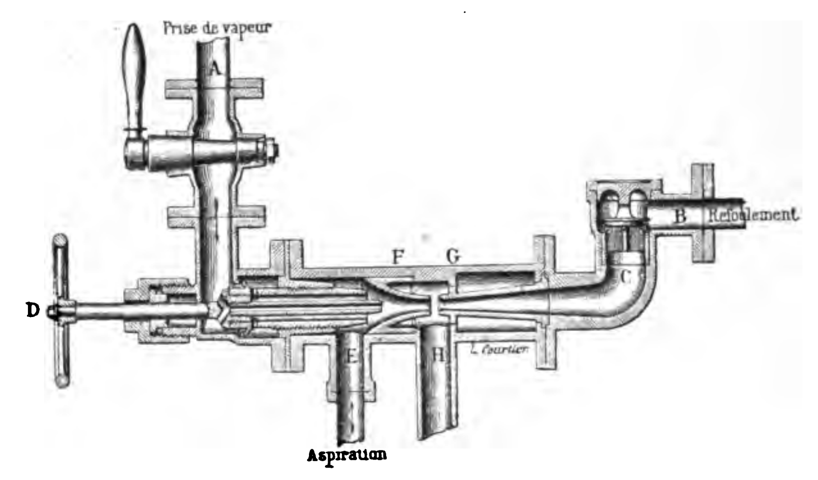


Fig. 699. — Injecteur Bouvret (coupe longitudinale).

le trop-plein H. Le principe de l'entraînement latéral des fluides, établi ci-dessus ([1]), détermine l'aspiration de l'eau de la bâche E, qui se trouve entraînée pêle-mêle avec la vapeur en partie condensée, sous la forme d'une émulsion. Si l'on ouvre progressivement l'admission ([2]), il vient un moment où l'impulsion du jet devient assez forte pour soulever le clapet G, et introduire l'eau dans a chaudière.

bize. *Leçons sur la machine à vapeur*, t. I, p. 775. — *Union. American machinist*, 31 janvier 1885, p. 3. — *Unique. Scientific American*, 20 juin 1885, p. 388. — Wahl et Pradel. Richard. *La chaudière locomotive*, p. 386. — Weild. *Annales industrielles*, 1883, t. I, p. 66.

([1]) Voy. t. I, p. 90, note 1.

([2]) On doit d'abord, après avoir enfoncé l'obturateur, ouvrir la prise de vapeur. On retire un peu l'aiguille pour amorcer, puis complètement quand le sifflement de la vapeur a cessé. On règle ensuite à l'aide de la manette qui agit sur le train des ajutages.

1120 — Dans ce phénomène d'apparence paradoxale (1), le travail nécessaire pour l'introduction du liquide à contre-pression est fourni par la chaleur que met en liberté la condensation de la vapeur au contact de l'eau froide (2). L'expérience le montre d'ailleurs avec évidence, car le Giffard marche mal, et refuse même de fonctionner avec de l'eau tiède (3), pour laquelle cette condensation manque de netteté; ou encore avec une trop grande proportion d'air, qui en est pour son propre compte incapable.

On a imaginé des *injecteurs multiples*, dans lesquels chacun des organes successifs fonctionne au sein du fluide fourni par le précédent (4). L'un aspire l'eau de la bâche, l'autre opère le refoulement dans la chaudière. On obtient par là plus de netteté dans l'action, et l'on arrive ainsi à relever dans une certaine mesure la température limite pour laquelle le jeu de l'appareil se trouve paralysé.

Quelquefois on se trouve dispensé de l'aspiration, si le réservoir est placé au niveau du générateur, ou en contre-haut.

(1) La puissance de l'appareil est même suffisante pour permettre au besoin de faire pénétrer l'eau dans une enceinte où s'exerce une tension supérieure à celle de la vapeur motrice. Cette propriété a été utilisée pour la construction de certains *injecteurs à vapeur d'échappement* (Richard. *La chaudière locomotive*, p. 383. — Hirsch et Debize. *Leçons sur les machines à vapeur*, t. I, p. 782. — *Revue industrielle*, 1883, p. 73. — *Portefeuille économique des machines*, 1884, p. 59. — *La Nature*, 7 mai 1881. — *Bulletin de l'Association amicale des Élèves de l'École des mines*, 1886, p. 121. — *Bulletin de la Société de l'industrie minérale de Saint-Étienne*, 1882, p. 127. — *Engineering*, 13 juillet 1881, p. 58 ; 1885, 1er semestre, p. 484. — *American machinist*, 29 juillet 1882. — *Official Gazette of the United-States*, t. XX, p. 392).

(2) On peut du reste remarquer que le fluide qui rentre dans la chaudière occupe un volume beaucoup plus petit que quand il en est sorti, même avec l'addition, proportionnellement considérable, de celui qu'il s'est adjoint en chemin. Le travail consommé pour cette introduction est donc en réalité moindre que le travail moteur fourni par l'évacuation ; la différence servant pour les autres effets à produire.

(3) Pour ce motif, l'injecteur, universellement employé sur les locomotives, et souvent dans les machines fixes, l'est rarement dans la marine, où l'eau des condenseurs à surface conserve ordinairement une température assez notable. On lui reproche également d'introduire de l'air dans la chaudière. On a essayé sans succès de combattre cet inconvénient par l'emploi de la vapeur surchauffée (injecteur Allaire).

(4) Injecteurs : Hanlock. *Appleton's cyclopædia*, t. II, p. 171. — Jenks. *American machinist*, 16 juillet 1881. — Körting (Richard et Baclé. *Manuel du mécanicien conducteur de locomotive*, p. 54. — Ser. *Physique industrielle*, t. II, p. 181. — *Engineering*, 1er décembre 1876, p. 474). — Park. Richard. *La chaudière locomotive*, p. 398.

1121 — On remarquera que, dans ce mode de fonctionnement, rien n'est perdu théoriquement. La chaleur mise en liberté et communiquée à l'eau froide, rentre avec celle-ci dans la chaudière. Ajoutons que cette circonstance est en outre très favorable à la régularité de l'allure, puisqu'elle évite le coup de froid qui serait sans cela produit dans le générateur par l'alimentation. Aussi a-t-on reconnu pratiquement, pour cet organe, des rendements remarquables [1] allant jusqu'à 88 % [2].

Il n'en est pas toujours de même pour une application analogue des mêmes principes, qui a donné naissance à une catégorie d'appareils appelés *élévateurs*. Ils sont destinés à faire surmonter par la force vive communiquée au fluide, non plus l'obstacle d'une pression intérieure, mais le travail de la gravité. Il y a lieu alors d'opérer une distinction.

Le rendement restera tout aussi parfait, si le genre d'industrie qui réclame cette élévation d'eau utilise en même temps sa chaleur, comme c'est le cas des teintureries, des établissements de bains, etc. Mais il n'en est plus de même dans le cas contraire, par exemple pour des pompes de cale, pour l'épuisement d'un étage inférieur de mine [3], pour les grues d'alimentation provisoires que l'on établit le long d'une ligne en construction, et dans lesquelles l'eau aura tout le temps de se refroidir avant d'être employée par une locomotive.

1122 — Il arrive parfois, si la proportion de l'eau et de la vapeur se trouve troublée par une cause quelconque, que l'appareil *se désamorce* et cesse de fonctionner. Le clapet retombe, la vapeur s'échappe par le trop-plein, et la manœuvre de mise en marche est à recommencer.

On a construit, en vue de parer à cet inconvénient, des *injecteurs à remise en marche automatique* (fig. 700). Aussitôt que les conditions normales se représentent dans leur harmonie, le système se

(1) Résal. *Mécanique générale*, t. IV, p. 188.

(2) Cependant cette supériorité a été parfois contestée (*The Engineer*, 2 juin 1876. — *Rail road Gazette*, 13 mai 1876).

(3) Haton de la Goupillière. *Cours d'exploitation des mines*, t. II, p. 327.

remet à fonctionner sans que l'on ait besoin de le régler à nouveau.

On peut employer par exemple une soupape de trop-plein qu gêne l'évacuation, et favorise la pénétration normale de la veine dans le générateur [1], ou encore une pièce mobile manœuvrée par la pesanteur [2], ou par le jet des pressions [3], de manière à établir ou à supprimer, suivant les circonstances, la continuité de l'appareil bi-conique.

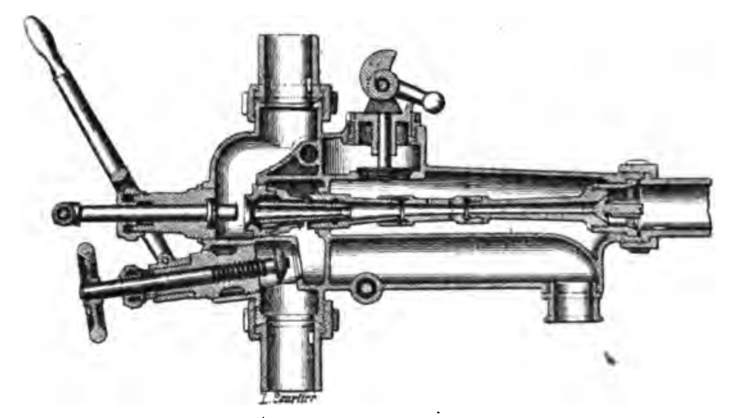


Fig. 700. — Injecteur automoteur Sellers (coupe longitudinale).

1123 — *Théorie.* — La théorie analytique de l'injecteur présente de grandes difficultés, en raison de l'ignorance où l'on se trouve en ce qui concerne l'état réel du fluide pendant son trajet à travers l'appareil. Nous nous bornerons, pour ce motif, à en donner un aperçu approximatif.

Appelons p la pression de la chaudière, p' celle qui règne au débouché de la tuyère, et ϖ le poids spécifique en ce même lieu. En assimilant purement et simplement cet écoulement à celui d'un liquide dans lequel la pesanteur n'intervient pas d'une manière

(1) Injecteur Cuan (Richard. *La chaudière locomotive*, p. 392. — *Revue générale des chemins de fer*, 1881, 1er sem., p. 334).

(2) Injecteur Gresham (Ser. *Physique industrielle*, t. II, p. 184. — Richard. *La chaudière locomotive*, p. 386).

(3) Injecteur Sellers (*Revue industrielle*, 1878, p. 62. — Hirsch et Debize. *Leçons sur les machines à vapeur*, t. I, p. 779. — *Revue générale des chemins de fer*, 1874. — Ledieu. *Nouvelles machines marines*, t. III, p. 189. — *Appleton's cyclopædia of applied mechanics*, t. II, p. 165. — Robinson. *Institution of mechanical engineers*, 1866. — *Engineering*, 22 novembre 1889, p. 611. — *Railroad Gazette*, 1881, p. 124).

appréciable, il vient [1] pour l'expression de la vitesse v de l'écoulement :

$$v = \sqrt{2g\frac{p-p'}{\varpi}}.$$

Soit m le poids de vapeur qui passe pendant un temps quelconque, en entraînant le poids d'eau M, et prenant avec lui la vitesse commune w. La quantité de mouvement de l'ensemble sera la même à la sortie et à la rentrée, puisqu'aucune force extérieure n'exerce une action sensible le long de ce parcours. On a d'après cela :

$$mv = (M+m)w.$$

Le mélange rentre d'une manière incessante dans la chaudière, en repassant de la vitesse w au repos, ainsi que de la tension p' à la pression p, et en surmontant pour cela un travail négatif, tandis qu'il avait précédemment passé du repos à la vitesse v, et de p à p', en recueillant un travail positif. L'équation des forces vives se présente donc sous une forme identique à la précédente :

$$w = \sqrt{2g\frac{p-p'}{\varpi'}},$$

obtenue par la substitution de w et ϖ' à v et ϖ respectivement.

On déduit de là, en divisant membre à membre :

$$\sqrt{\frac{\varpi'}{\varpi}} = \frac{v}{w} = \frac{M+m}{m},$$

et par suite :

$$\frac{M}{m} = \sqrt{\frac{\varpi'}{\varpi}} - 1.$$

J'appelle d'autre part θ la température de l'eau froide, et θ' celle que prend l'ensemble. Chaque kilogramme d'eau exige une calorie

(1) Voy. t. I, p. 47, éq. 16.

pour élever sa température d'un degré. Il en faut donc en tout M $(\theta' - \theta)$ pour l'échauffement du liquide. De son côté chaque kilogramme de vapeur renfermait (1) λ calories (en sus de la valeur que prend l'énergie interne à la température de la glace fondante). Il n'en possède plus que θ' après le mélange. Ce fluide a donc perdu en tout $m(\lambda - \theta')$ calories. Nous admettrons d'après cela l'équation :

$$M(\theta' - \theta) = m(\lambda - \theta'),$$

qui peut se mettre sous la forme :

$$\frac{M}{m} = \frac{\lambda - \theta}{\theta' - \theta} - 1.$$

Il suit de ces deux expressions du rapport des poids, l'égalité :

$$\sqrt{\frac{\varpi'}{\varpi}} = \frac{\theta' - \theta}{\lambda - \theta}.$$

En réalité ϖ' et θ' nous sont inconnus. Tout ce que nous pouvons affirmer *a priori* est que d'une part :

$$\varpi' < 1\,000,$$

puisque le mélange ne saurait s'identifier avec l'eau que par une condensation absolument complète; et que :

$$\theta' < 100,$$

attendu que la masse liquide traverse, sans rentrer en vapeur, une enceinte placée en libre communication avec l'atmosphère extérieure.

Si donc nous substituons pour ces inconnues les valeurs précédentes, l'équation se transforme dans l'inégalité suivante :

$$\sqrt{\frac{1000}{\varpi}} > \frac{\lambda - 100}{100 - \theta} + 1.$$

(1) Voy. t. I, p. 774, éq. 124.

Or λ est déterminé dans chaque cas, et varie fort peu (n° 934) avec la pression p, qui modifie au contraire notablement ϖ. On voit donc que cette relation sera d'autant plus facile à satisfaire que les valeurs de ϖ et θ seront plus faibles, c'est-à-dire que l'eau d'alimentation sera plus froide, et la pression de la chaudière moins élevée. L'expérience a pleinement confirmé ces deux conséquences du calcul.

§ 3

RÉGULATEURS D'ALIMENTATION

1124 — *Généralités.* — La surveillance de l'alimentation est très essentielle. Une trop grande affluence d'eau tend à augmenter le primage. Un abaissement du niveau expose aux coups de feu, et peut créer un danger imminent d'explosion (n° 1178). Une grande vigilance s'impose donc pour le mécanicien.

On a songé à lui substituer, ou plutôt à lui associer des moyens automatiques mis en jeu par les variations du niveau de l'eau lui-même [1]. Un *régulateur d'alimentation* supposé parfait serait évidemment d'une grande utilité. Cependant il ne faut pas perdre de vue que le meilleur appareil peut toujours se déranger, et que la confiance qu'on lui avait accordée devient alors un grand danger, attendu que l'attention du mécanicien, endormie par la sécurité qu'avait inspirée l'appareil, n'est pas avertie du nouvel état des choses. On se trouve ainsi, au lieu d'un supplément de garantie, n'avoir même plus celles que présentent les conditions ordinaires.

Quoi qu'il en soit, les dispositifs les plus variés ont été proposés à cet égard [2]. On peut les rattacher à trois systèmes principaux.

[1] Worms de Romilly. Sur un alimentateur de niveau constant. *Annales des mines*. 6e série, t. II, p. 415; VII, 254. — Alimentateurs épurateurs à niveau constant. *Revue universelle des mines et de la métallurgie*, 1879, t. V, p. 601. — Régulateur automatique d'alimentation. *Portefeuille économique des machines*, 1885, p. 110.

[2] Régulateurs d'alimentation : Chalus. *Génie civil*, t. XIV, p. 203. — Cohnfeld. *Revue industrielle*, 1879, p. 376. — Connery. *Ibidem*, 4 août 1887, p. 306. — Dervaux. Hirsch. *Rapport sur l'Exposition de* 1878, p. 120. — Edwards. *American machinist*. 17 juillet 1886, p. 3. — Foss. *Scientific american*, 11 décembre 1886, p. 371. — Franklin. *Bulletin de la Société d'encouragement*, 1825, p. 171. — Gauchot (*Revue industrielle*, 12 septembre 1883, p. 365. — *Portefeuille économique des machines*, 1883, p. 140). — Geneste et Herscher. Ser. *Physique industrielle*, t. II, p. 190. — Lethuillier-

1125 — *Régulateur d'alimentation Belleville.* — Le plus répandu repose sur l'emploi d'un flotteur (fig. 701), comme dans l'appareil qui fait partie de la chaudière Belleville ([1]).



Fig. 701. — Régulateur d'alimentation Belleville. (Coupe verticale).

Ce principe général est fort simple, mais il n'est pas irréprochable. D'une part la sortie de la tige du flotteur à travers l'enveloppe, pour actionner l'appareil d'alimentation, doit concilier l'étanchéité avec une suffisante liberté de mouvement, nonobstant la rouille, l'entartrement, etc.

Mais en outre le flotteur lui-même est sujet à caution. Il consiste en une lentille creuse en tôle, et l'on doit craindre que, sous la pression de la chaudière, et sans que l'on en soit averti, il ne s'introduise de l'eau à travers les plus minces fissures des joints. S'il en est ainsi, le poids du flotteur étant changé, le jeu de l'appareil se trouve déréglé.

Il convient de placer autant que possible les flotteurs dans des compartiments spéciaux, séparés du reste du bain liquide par une cloison percée de petits trous, afin d'amortir les oscillations que détermine une ébullition tumultueuse.

Pinel (Armengaud. *Publication industrielle*, 2e série, t. VIII, p. 435. — *Revue industrielle*, 1878, p. 426. — *Annales industrielles*, 1884, t. I, p. 339). — Macabiès (*Revue industrielle*, 1879, p. 317. — *Portefeuille économique des machines*, 1869, p. 59. — *Propagation industrielle*, 1er août 1869. — *Comptes rendus mensuels des séances de la Société de l'industrie minérale de Saint-Étienne*, décembre 1876, p. 4. — Péclet. *Traité de la chaleur*, t. II, p. 78. — Marché. *Les Mondes*, t. XL, p. 472. — Mariotte. Hirsch. *Rapport sur l'Exposition de* 1878, p. 119. — Martin et Potez. Expériences de Tresca. *Annales du Conservatoire*, 25 novembre 1854. — Poignon et Liénard. *Écho des mines et de la métallurgie*, 1876, p. 119. — Thirion. *Propagation industrielle*, 1er août 1869. — Ulmann. *Revue industrielle*, 1880, p. 506. — Valant et Ternois. *Annales des mines*, 1865, 2e semestre, p. 254.

([1]) Hirsch et Debize. *Leçons sur les machines à vapeur*, t. I, p. 614.

1126 — *Régulateur d'alimentation Fromentin.* — On peut en

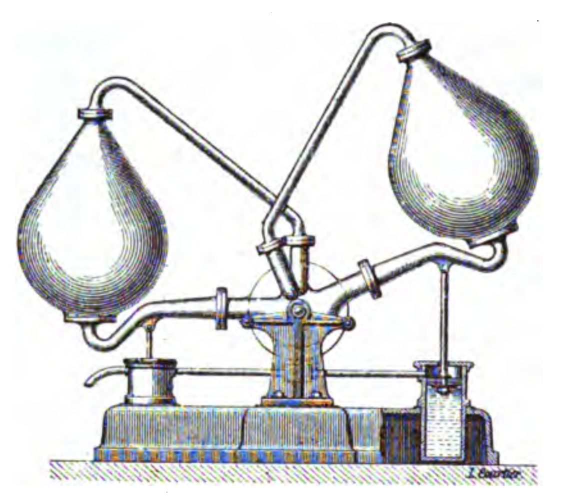


Fig. 702. — Régulateur d'alimentation Fromentin (élévation).

second lieu (fig. 702), comme dans l'alimentateur Fromentin [1], avoir recours à un vase-contrepoids, percé à sa base d'un orifice,

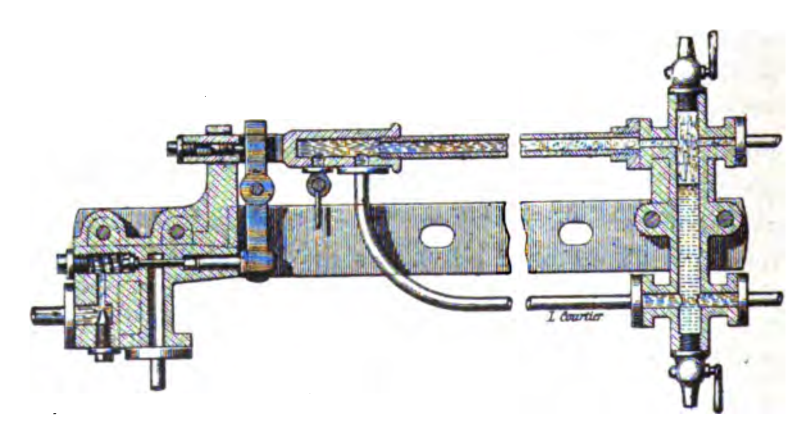


Fig. 703. — Régulateur d'alimentation Cleuet (coupe verticale).

auquel s'adapte un tube suffisamment flexible ou une rotule, établissant la communication avec l'intérieur de la chaudière exacte-

(1) *Revue industrielle*, 11 janvier 1882, p. 15; 19 novembre 1885, p. 461. — *Proceedings of the Institution of mechanical engineers*, novembre 1882, p. 479. — Hirsch et Debize. *Leçons sur les machines à vapeur*, t. I. p. 757.

ment au niveau voulu. Selon que cette embouchure sera plongée dans l'eau ou dans la vapeur, le récipient se remplira d'eau par condensation, ou restera plein de vapeur; son poids variera ainsi considérablement, ce qui déterminera le basculement du système dans un sens ou dans l'autre.

1127 — *Régulateur d'alimentation Cleuet.* — Un troisième principe, dû à M. Cleuet [1] fait intervenir un tube horizontal rigide (fig. 703), dont l'insertion dans le corps cylindrique s'opère au niveau voulu. Selon que cet organe se trouve rempli d'eau ou de vapeur, en raison des variations du niveau, il résiste d'une manière très différente au refroidissement par l'air ambiant. Il se dilate donc ou se contracte alternativement, et les variations de sa longueur, suffisamment amplifiées par un mécanisme de transmission, servent à engager au moment utile l'alimentation.

[1] *Annales des mines*, 1862, 2ᵉ semestre, p. 415. — Hirsch. *Rapport sur l'Exposition de* 1878, p. 119.

CHAPITRE LX

DÉPOTS

—

§ 1

INCRUSTATIONS

1128 — La plupart des eaux que l'on emploie pour l'alimentation des chaudières contiennent des matières en dissolution, susceptibles d'agir de deux manières différentes, mais également nuisibles. Les unes sont *corrosives*, et attaquent le métal. Nous reviendrons plus loin sur ce côté de la question (n° 1137). Les autres sont *incrustantes*. Sans exercer d'action chimique, elles restent dans les générateurs après l'évaporation du dissolvant (fig. 704), et y deviennent par leur simple présence une source d'inconvénients, et même de dangers très graves ([1]).

([1]) Lodin. Note sur les incrustations. *Annales industrielles*, 22 août 1880, p. 244. — Brull et Langlois. Incrustations. *Revue universelle des mines et de la métallurgie*, t. XXV-XXVI, p. 367, 453, 466. — Olivier. *Note sur les défauts, corrosions et incrustations des chaudières à vapeur*, 1883. — Recherches sur l'incrustation des chaudières à vapeur. *Annales des Ponts et Chaussées*, octobre 1854. — Jacqmin. *Traité des machines à vapeur*, t. II. — Imbert. Analyse de tartres. *Compte rendu mensuel des séances de la Société de l'industrie minérale de Saint-Étienne*, mars 1876. — Pauly. Concrétions ferrugineuses dans les générateurs. *Mémoires de la Société des Ingénieurs civils*, avril 1889, p. 671. — Péclet. *Traité de la chaleur*, t. II, p. 99.

Vivian. Boiler deposits (*Engineering*, 1er mai 1891, p. 539. — *Scientific american supplement*, 30 mai 1891, p. 12843). — Dangers of boiler scale. *Ibidem*, 10 mai 1890, p. 11 967. — Rowan. On boiler incrustation and corrosion. *British Association*, septembre 1876. — *Engineering*, 8 décembre 1871, p. 381. — Wallace. On boiler incrustations. *Philosophical Society of Glasgow*, t. IV. — Wilson. *Steam boilers*. — Davis. On boiler incrustations. *Proceedings of the Manchester scientific and mechanical Society*, mai 1879. — Rogers. Steam boiler incrustation. *Journal of Franklin Institute*. 1872. — Jensen. On the incrustation of marine boilers. *Transactions of the Society of Engineers*, 1866.

L'idéal serait donc d'alimenter avec de l'eau pure (1). L'eau de pluie recueillie dans des citernes convient très bien à cet égard. A son défaut, le produit des condenseurs de surface (n° 1230), sans mélange avec l'eau réfrigérante, remplit à peu près le même but. Cependant il renferme une partie des corps gras qui ont servi à lubrifier les pièces de la machine, et qui provoquent dans la chaudière un danger spécial (§ 3).

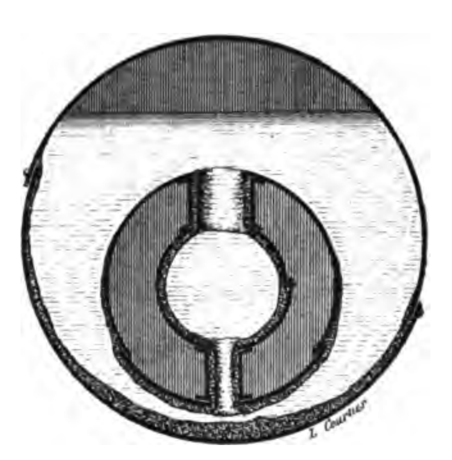


Fig. 704.
Entartrement d'une chaudière de Cornouailles à bouilleur intérieur (coupe transversale).

L'eau de mer contient une grande quantité de sels alcalins, qui n'entraînent pas les mêmes conséquences que les sels alcalino-terreux (dont elle renferme d'ailleurs également une certaine proportion), mais qui déterminent des assujettissements particuliers dont nous aurons également à parler (§ 4).

L'inconvénient le plus sérieux réside dans la présence des sels alcalino-terreux : principalement les sulfates et carbonates de chaux et de magnésie. En l'absence de précautions suffisantes, ces matières s'agglomèrent au contact de la tôle, sous la forme d'une couche pierreuse appelée *tartre* ou *incrustations*, laquelle se durcit par la calcination.

Pour remédier au mal, il se présente deux moyens : ou bien purifier les eaux avant leur entrée dans la chaudière (§ 5), ou s'opposer, dans cette enceinte même, à l'aide d'agents spéciaux appelés désincrustants (§ 6), à leur agglomération sous forme de tartre, en les maintenant à l'état de boue liquide, de manière que l'entretien normal (§ 7) permette de s'en débarrasser facilement.

(1) Cependant on a prétendu que l'eau distillée attaque le fer; au point que dans la marine on la coupe avec un peu d'eau de mer. Mais en même temps cette assertion a été contestée (Lodin. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, 26 juillet 1880. — Jack. *Bulletin de la Société d'encouragement*, 1866).

Tel est le programme de l'étude que comporte ici cette importante question.

1129 — Les inconvénients de l'entartrement sont nombreux.

En premier lieu, ce revêtement empêche l'inspection des surfaces métalliques.

L'enlèvement des incrustations est pénible, et il est difficile de le réussir sans risquer d'endommager la tôle, dont les blessures peuvent devenir l'origine d'accidents ultérieurs.

La mauvaise conductibilité des matières pierreuses (1) diminue sensiblement le rendement calorifique du combustible : jusqu'à 40 % selon M. Cousté (2) ; 50 % d'après les expériences de Tresca (3) ; 60 % suivant M. Wilson (4).

L'enveloppe, n'étant plus préservée directement par le contact de l'eau, s'échauffe beaucoup plus que dans le mode ordinaire. Elle se trouve dès lors exposée aux coups de feu, et aux dilatations irrégulières qui compromettent sa durée.

Enfin les incrustations constituent un danger d'explosion. En effet la différence des coefficients de dilatabilité du métal et des matières pierreuses hétérogènes qui adhèrent à sa surface, détermine le fendillement de ces dernières, et parfois leur soulèvement en plaques. L'eau arrive alors au contact de la tôle, qu'elle ne mouillait pas auparavant, et qui a pu rougir. De là une production instantanée de vapeur susceptible de faire monter subitement la pression, et de déterminer une déchirure de l'enveloppe.

§ 2

COMPOSITION CHIMIQUE DES INCRUSTATIONS

1130 — Je crois faire une chose utile à la science et à l'industrie, en publiant ici un ensemble inédit de quarante et une analyses chimiques de tartres de chaudières, qui ont été effectuées au Bureau d'Essai annexé à l'École nationale supérieure des mines, et

(1) Égale à $\frac{1}{37}$ de celle du fer (Rogers. *Steam boilers water and incrustations*).

(2) *Annales des ponts et chaussées*, septembre-octobre 1854.

(3) *Annales du Conservatoire*.

(4) Wilson. *A Treatise of steam boilers*, p. 165.

qui sont dues à M. Rioult, l'un des chimistes de ce laboratoire dirigé par M. Ad. Carnot, inspecteur de l'École des mines.

Je les ai, autant que possible, groupées par séries relatives à un même générateur plus ou moins complexe, de manière à permettre d'apprécier les variations, souvent très notables, que présente la composition de ces dépôts dans les diverses parties de l'appareil.

Indépendamment des éléments qui sont mentionnés ci-dessous, ces analyses ont toutes décelé des *traces* de chlorures alcalins. On s'est abstenu de répéter cette indication pour chacune d'elles.

Première série. — Chaudière tubulaire, alimentée avec l'eau des puits de Lille, 1878.

SUBSTANCES	CORPS CYLINDRIQUE	BOUILLEUR SUPÉRIEUR	BOUILLEUR INFÉRIEUR
Sable, argile	5,00	5,30	8,60
Sulfate de chaux	1,90	1,70	1,00
Carbonate de chaux	90,00	82,00	82,00
Carbonate de magnésie	2,30	9,00	7,60
Peroxyde de fer	0,30	1,30	0,60
Eau, matières organiques . . .	traces	traces	traces
TOTAL	99,50	99,30	99,80

Deuxième série. — Chaudière ordinaire, alimentée avec l'eau des canaux de Lille, 1878.

SUBSTANCES	CORPS CYLINDRIQUE	BOUILLEUR DROIT	BOUILLEUR GAUCHE
Sable, argile	8,40	7,10	9,30
Sulfate de chaux	39,00	48,00	37,50
Carbonate de chaux	32,40	37,60	44,70
Carbonate de magnésie	11,50	4,20	5,50
Peroxyde de fer	5,00	0,80	0,60
Eau, matières organiques . . .	2,80	2,20	1,60
TOTAL	99,10	99,90	99,20

Troisième série. — Chaudière alimentée avec l'eau des puits de Tourcoing, 1878.

SUBSTANCES	CORPS CYLINDRIQUE	BOUILLEUR DROIT	BOUILLEUR GAUCHE	TUYAU D'ALIMENTATION
Sable, argile.	15,60	11,60	15,00	2,00
Sulfate de chaux.	59,50	41,60	45,00	3,30
Carbonate de chaux.	13,60	35,00	29,00	90,50
Carbonate de magnésie	9,80	8,50	8,60	3,40
Peroxyde de fer	0,80	2,60	1,60	0,30
Eau, matières organiques . . .	0,30	0,30	0,60	0,30
TOTAL.	99,60	99,60	99,80	99,80

Quatrième série. — Chaudière alimentée avec l'eau du Cambraisis, 1878.

SUBSTANCES	RÉCHAUFFEUR SUPÉRIEUR	CANALISATION DE CE RÉCHAUFFEUR au suivant	RÉCHAUFFEUR MOYEN	CANALISATION DE CE RÉCHAUFFEUR au suivant	RÉCHAUFFEUR INFÉRIEUR
Sable, argile	0,30	0,10	0,30	1,60	0,60
Sulfate de chaux	—	—	—	—	—
Carbonate de chaux	96,60	96,00	94,30	94,60	93,00
Carbonate de magnésie. . .	2,10	2,20	2,30	2,40	2,20
Peroxyde de fer.	0,60	1,20	2,60	1,00	3,60
Eau, matières organiques. .	traces	traces	traces	traces	traces
TOTAL.	99,60	99,50	99,50	99,60	99,40

Cinquième série. — Chaudière de Roubaix, alimentée avec l'eau de la Lys, 1878. Les deux dernières matières contiennent une si forte proportion de goudron qu'elles brûlent avec flamme.

SUBSTANCES	CORPS CYLINDRIQUE	BOUILLEUR DROIT	BOUILLEUR GAUCHE	RÉCHAUFFEUR SUPÉRIEUR	RÉCHAUFFEUR MOYEN	RÉCHAUFFEUR INFÉRIEUR
Sable, argile.	10,00	12,00	10,60	2,00	1,60	5,00
Sulfate de chaux . . .	6,50	6,80	4,00	0,80	0,70	0,30
Carbonate de chaux. .	60,00	66,30	76,30	83,00	22,00	26,00
Carbonate de magnésie.	16,00	11,90	6,30	7,90	4,50	1,30
Peroxyde de fer. . . .	5,60	2,00	2,00	3,30	3,60	7,00
Eau, matières organ. .	1,00	0,50	0,30	2,60	67,00	60,00
Cuivre.	—	—	—	—	0,15	0,20
TOTAL.	99,10	99,50	99,50	99,60	99,55	99,80

Sixième série. — Chaudière ordinaire du Nord de la France, 1878. Quelques-uns de ces échantillons, spécialement le dernier, renferment tant de goudron qu'ils brûlent avec flamme.

SUBSTANCES	CORPS CYLINDRIQUE	BOUILLEUR DROIT	BOUILLEUR GAUCHE	RÉCHAUFFEUR SUPÉRIEUR	RÉCHAUFFEUR MOYEN	RÉCHAUFFEUR INFÉRIEUR
Sable, argile.	11,00	12,60	13,30	traces	1,30	10,30
Sulfate de chaux . . .	1,60	5,30	4,20	0,50	1,00	5,60
Carbonate de chaux. .	53,00	41,00	38,00	93,00	80,00	10,00
Carbonate de magnésie.	18,60	25,00	29,00	2,60	9,50	1,30
Peroxyde de fer. . . .	6,30	6,00	7,10	3,00	4,10	12,30
Eau, matières organ. .	9,30	10,00	8,00	0,60	4,00	57,20
Cuivre.	—	—	—	—	—	3,10
TOTAL. . . .	99,80	99,90	99,60	99,70	99,90	99,80

Septième série. — Chaudière ordinaire du Nord de la France, 1878. Les matières du corps cylindrique et du réchauffeur inférieur contiennent beaucoup de goudron, et brûlent avec flamme.

SUBSTANCES	CORPS CYLINDRIQUE	BOUILLEUR DROIT	BOUILLEUR GAUCHE	RÉCHAUFFEUR SUPÉRIEUR	RÉCHAUFFEUR MOYEN	RÉCHAUFFEUR INFÉRIEUR	TUYAU D'ALIMENTATION
Sable, argile	5,00	7,30	31,30	traces	traces	13,30	0,30
Sulfate de chaux . . .	7,60	7,60	18,30	0,96	1,20	5,90	2,00
Carbonate de chaux. .	62,30	70,50	30,20	95,00	92,60	8,40	91,00
Carbonate de magnésie.	3,40	6,40	12,30	3,10	4,10	1,10	3,60
Peroxyde de fer. . . .	6,60	2,00	2,30	0,20	0,20	14,00	0,60
Eau, matières organ. .	15,00	5,60	5,50	0,60	1,60	53,60	2,00
Cuivre.	—	—	—	—	—	3,50	—
TOTAL.	99,90	99,40	99,70	99,86	99,70	99,80	99,50

Huitième série. — Deux analyses détachées, remarquables par la grande surabondance de silice combinée à la chaux ou à la magnésie, en dehors de l'argile (silicate d'alumine). Eau de Giromagny (territoire de Belfort).

SUBSTANCES		1886	1888
Argile	Alumine. . . .	3,60	2,30
	Silice	7,20	4,60
Silicates alcalino-terreux.	Silice	10,40	5,60
	Chaux.	12,05	3,30
	Magnésie. . . .	—	3,10
Sulfate de chaux.		17,56	65,48
Carbonate de chaux		25,20	—
Carbonate de magnésie.		12,18	—
Peroxyde de fer		10,00	4,30
Eau, matières organiques.		0,80	10,80
TOTAL.		98,99	99,48

Neuvième série. — Cinq analyses détachées :

N° 1. Dépôt de chaudière formé directement, 1873.

N° 2. Matière pulvérulente désincrustée par la glycérine, 1873.

N° 3. Dépôt désincrusté par la glycérine, 1871.

N° 4. Explosion. Dépôt adhérent à une tôle diminuée de la moitié de son épaisseur, 1879.

N° 5. Dépôt d'une chaudière désincrustée par le zinc, 1884.

SUBSTANCES	N° 1	N° 2	N° 3	N° 4	N° 5
Sable, argile	3,00	6,00	non dosé	6,00	1,60
Sulfate de chaux.	11,00	20,50	5,25	—	52,34
Carbonate de chaux	61,50	45,00	50,60	62,00	—
Carbonate de magnésie. . .	21,00	25,00	34,50	17,00	12,98
Peroxyde de fer.	non dosé	non dosé	non dosé	11,20	0,35
Eau, matières organiques. .	non dosé	non dosé	non dosé	3,60	0,10
Oxyde de zinc.	—	—	—	—	33,15
TOTAL.	»	»	»	99,80	100,52

§ 3

CORPS GRAS

1131 — L'attention a été appelée depuis un certain temps sur un danger très sérieux, qui est occasionné par l'alimentation avec les eaux grasses fournies par le condenseur ([1]). Cet inconvénient

([1]) Danger des dépôts huileux. *La métallurgie*, 16 septembre 1891, p. 1443. — Marquard. Action destructive des graisses. *Bulletin de la Société d'encouragement*, 3e série, t. VIII, p. 400. — Maurice Jourdain. Influence des graisses. *Premier bulletin de l'Association parisienne des Propriétaires d'appareils à vapeur*. — Pereyre. Note sur l'action des matières grasses. *Annales des mines*, 7e série, t. XIV, p. 88. — Mercier. *Ibidem*, t. XV, p. 236. — Farcot. Danger de certaines eaux pour l'alimentation des chaudières. *Mémoires de la Société des Ingénieurs civils*, 1867, p. 326. — *Ibidem*, 1852, p. 289, 296; 1880, 212. — Delaunay. Les chaudières à haute pression, in-8°, p. 63. — *Congrès des Ingénieurs en chef des Associations de Propriétaires d'appareils à vapeur*, Bruxelles, 1877, p. 115; Bordeaux, 1882, p. 92. — *Revue industrielle*, août 1876, p. 412; mars 1881, p. 125; décembre 1891, p. 507.

Fletcher. *Overheating of furnace crowns and other boiler plates when covered with*

tend même à se développer avec la nouvelle habitude de graisser dans la vapeur (n° 926).

M. Hirsch a fait à cet égard une expérience fort intéressante. Si l'on place sur un feu ardent une casserole en fer battu remplie d'eau, l'ébullition s'effectue dans des conditions ordinaires, même avec une proportion suffisamment restreinte de sels terreux. Mais si, avant de verser l'eau, on a frotté le fond avec un chiffon imbibé d'huile de lin, on voit bientôt se former au centre une tache lumineuse qui se développe rapidement. Le métal est devenu rouge, et en même temps l'ébullition ne procède plus qu'avec lenteur. Une imperceptible couche d'huile végétale suffit donc pour empêcher le contact de l'eau et de la paroi, seule sauvegarde de celle-ci contre l'échauffement.

Ce phénomène ne se produit pas avec de l'huile minérale, à la condition toutefois que l'eau ait été versée à froid, avant toute atteinte de la chaleur capable d'altérer ce lubrifiant ; sans quoi les mêmes circonstances se reproduiraient.

Ces faits révèlent un danger évident de coup de feu pour les chaudières dans lesquelles l'admission de corps gras arriverait à reproduire fortuitement un concours de circonstances analogues. De là un argument en faveur de l'emploi des huiles minérales pour le graissage, de préférence aux huiles organiques (n° 921). On ne perdra pas de vue d'ailleurs que la composition des huiles du commerce est loin d'être toujours parfaitement connue.

1182 — L'influence fâcheuse des corps gras se manifeste également sous une autre forme. On a observé à maintes reprises, dans des générateurs dont l'allure occasionnait des surprises et des inquiétudes [1], la présence d'une poudre brune ou grise, suivant les cas, et douce au toucher. L'eau ne la mouille pas, et se trouve

water. — *Mechanic's Magazine*, 17 et 24 septembre, 1er octobre 1870. — *The Engineer*, 1873, t. II, p. 94, 286 ; 1875, t. II, p. 291, 310, 349.

Zeitschrift des Verbandes der Dampfkessel über Wachnungs Vereines. — Stingl et Wartha. *Dingler's polytechnisches Journal*, t. CCXV, p. 115. — Wilson. *Ibidem*, p. 166, 242. — *Mittheilungen auf dem Gebiete des Seewesens* t. VII, p. 523.

[1] Fentes, criques, fuites persistantes, etc. (*Société des sciences industrielles de Lyon*, 15 mars 1882).

par suite placée, par rapport au métal qui en est tapissé, dans l'état d'isolement dont nous venons d'indiquer les conséquences.

Ce composé complexe a été assimilé à un savon terreux, dû à la réaction réciproque de l'huile et des bases alcalino-terreuses; laquelle s'accomplit sans doute d'une manière variable avec la nature des éléments en présence.

Ajoutons qu'une telle saponification est de nature à mettre en liberté l'acide oléique, capable de corroder les tôles, surtout aux températures élevées.

1133 — Le remède radical à cette singulière cause de dangers serait évidemment l'abstention de l'emploi des eaux du condenseur. Mais celui-ci se recommande au point de vue de l'économie de chaleur, et surtout de l'élimination des sels calcaires, quand on repasse dans les générateurs l'eau distillée des condenseurs à surface, qui sont de plus en plus répandus dans la marine.

Tout au moins convient-il d'épurer le mieux possible ces eaux par un dégraissage méthodique [1], et de saturer ce qui reste de matière grasse par la soude ou la chaux [2].

1134 — Des effets analogues à celui des corps gras ont été signalés pour des chaudières de sucreries, alimentées avec des eaux de condensation qui étaient imprégnées de substances visqueuses provenant de fuites des appareils de chauffage [3].

[1] Dégraisseurs d'eau d'alimentation : Barnard, *American machinist*, 26 décembre 1889, p. 8. — Fowden. *Ibidem.*, 21 juillet 1888, p. 1. — Jartan. *Chronique industrielle*, 5 juillet 1889, p. 296. — Lencauchez et Durant (*Mémoires de la Société des Ingénieurs civils*, juin 1890, p. 562. — *Bulletin de la Société d'Encouragement*, octobre 1891, p. 562. — *Bulletin de la Société de l'industrie minérale de Saint-Étienne*, 2ᵉ série, t. X, p. 540. — *Comptes rendus mensuels des séances de la Société de l'industrie minérale de Saint-Étienne*, 1881, p. 217). — Leroy et Cail. *Annales des mines*, novembre-décembre 1890, p. 201. — Van Duzen. *Scientific american*, 30 mai 1885, p. 342. — Weetsone et Gran. *American machinist*, 28 octobre 1885, p. 4.

[2] *Bulletin de la Société d'encouragement*, 1878, p. 543. — Ledieu. *Nouvelles machines marines*, t. III, p. 420. — Richard. *La chaudière locomotive*, in-4°, p. 326. — Hétet et Risbec (*Mémorial du Génie maritime*, 1876. — *Bulletin de la Société d'encouragement*, 1878, p. 543).

[3] *Annales des mines*, 7ᵉ série, t. XIV, p. 549.

§ 4

SALURE

1135 — Les chaudières marines ont à compter comme les autres avec les sels terreux, car ces derniers se trouvent en dissolution dans l'eau de la mer. Mais en outre, les sels alcalins arriveraient à prendre, en raison du rapprochement des liqueurs, un degré de concentration inadmissible. On se voit donc obligé à des purges fréquentes, pour en rejeter une partie au dehors. Une *pompe de salure* enlève en conséquence cette eau chaude, que l'on expulse à travers des conduits destinés à utiliser sa température, au profit de l'eau d'alimentation qui vient la remplacer et fournir en outre à la vaporisation.

On peut concevoir deux modes extrêmes à cet égard : 1° le type discontinu, dans lequel on attendrait la production du degré de concentration qui ne doit pas être dépassé, pour vider complètement la chaudière et introduire une charge nouvelle ; 2° un mode absolument continu, où les deux fonctions s'accompliraient d'une manière incessante et parallèlement.

Le premier système est évidemment inadmissible pour toutes sortes de motifs. Le second serait parfait en principe, mais d'une réalisation malaisée. On se placera donc entre les deux solutions, en se rapprochant le plus possible de la seconde ; et l'on opérera des *extractions* périodiques suffisamment rapprochées.

Il y a lieu dès lors de déterminer la proportion à établir entre le poids à extraire, et celui de la vapeur formée dans l'intervalle de deux purges.

1136 — Appelons à cet effet P le poids total de l'eau que renferme le générateur, au moment où l'on va commencer une opération. Soit p le poids volatilisé entre deux purges consécutives, et p' celui que l'on extrait à chaque fois. Appelons encore S le degré de salure au moment de l'extraction, et s celui de l'océan.

L'opération s'effectue de la manière suivante. Avant d'opérer

l'enlèvement du poids p', on commence par en restituer la moitié $\frac{p'}{2}$ en eau de mer naturelle, ce qui porte la valeur du contenu total à $P + \frac{p'}{2}$. C'est à ce moment que l'on extrait le poids p' de ce mélange. On laisse donc dans la chaudière $P - \frac{p'}{2}$, c'est-à-dire la quantité de sel :

$$\left(P - \frac{p'}{2}\right) S.$$

On ajoute alors la seconde moitié $\frac{p'}{2}$ d'eau naturelle, qui apporte avec elle la salure :

$$\frac{p'}{2} s.$$

La vaporisation continue ensuite jusqu'à l'extraction suivante, et emporte le poids p d'eau distillée. L'alimentation normale le remplace progressivement par une quantité p d'eau de mer, qui introduit dans la chaudière la quantité de sel :

$$ps.$$

Tels sont les différents apports qui constituent le total du sel renfermé dans le générateur à la fin de la période. Si donc nous représentons par S_0 la teneur-limite que l'on ne veut pas dépasser, ce total sera représenté par PS_0, et l'on pourra poser :

$$(1) \qquad PS_0 = \left(P - \frac{p'}{2}\right) S + \left(\frac{p'}{2} + p\right) s.$$

Envisageons maintenant l'extraction qui succède à celle-ci. On commence, ainsi qu'il a été dit, par ajouter le poids d'eau de mer $\frac{p'}{2}$ qui apporte avec lui :

$$\frac{p'}{2} s,$$

en élevant par conséquent le total précédent à :

$$\left(P - \frac{p'}{2}\right) S + (p + p') s.$$

Ce poids de sel se trouve, à cet instant, renfermé dans la quantité d'eau $P + \frac{p'}{2}$. On en peut par conséquent déduire la valeur, provisoirement inconnue, de la teneur S qui règne dans le générateur au moment de l'extraction. Il vient en effet :

$$S = \frac{\left(P - \frac{p'}{2}\right) S + (p + p') s}{P + \frac{p'}{2}},$$

équation du premier degré par rapport à S, de laquelle on déduit :

$$S = \frac{p + p'}{p'} s.$$

Reportons cette expression dans l'équation (1). Elle donnera successivement :

$$PS_0 = \left(P - \frac{p'}{2}\right) \frac{p + p'}{p'} s + \left(p + \frac{p'}{2}\right) s,$$

$$P \frac{S_0}{s} = P\left(1 + \frac{p}{p'}\right) + \frac{p}{2},$$

et enfin :

$$\frac{p}{p'} = \frac{S_0 - s}{s} - \frac{1}{2} \frac{p}{P}.$$

Telle est la valeur cherchée qu'il est nécessaire de donner à l'extraction p', en fonction de la durée de la période, caractérisée par la quantité p de vapeur formée dans l'intervalle, du degré-limite de salure S_0 que l'on ne veut pas dépasser, et de l'importance de la chaudière, représentée par le poids P.

Si l'on veut tendre par la pensée vers l'alimentation continue, p et p' s'annulent ensemble ; mais leur rapport converge vers la limite :

$$\frac{p}{p'} = \frac{S_0 - s}{s}.$$

Proposons-nous, par exemple, de concentrer au décuple :

$$S_0 = 10\,s,$$

il vient alors :

$$\frac{p'}{p} = 0{,}11.$$

Il faudrait donc extraire 110 grammes d'eau-mère par kilogramme de vapeur formée.

Dans la pratique, on se règle de préférence sur le sulfate de chaux, qui est plus à redouter que le sel marin.

§ 5

ÉPURATION

1137 — *Généralités.* — Les eaux peuvent renfermer des matières *en suspension* ou *en dissolution.* On sépare les *troubles* à l'aide de bassins de dépôt, ou de filtres rapides.

Si les substances dissoutes sont acides [1], et capables d'attaquer le fer, on les sature à l'aide d'une base, qui est ordinairement l'eau de chaux. On lui substitue le carbonate de soude, si l'on craint qu'un excès de chaux se dépose dans les chaudières.

Les matières organiques se rencontrent fréquemment dans les

[1] La plupart des eaux de mines exercent une forte réaction acide, due à l'oxydation des pyrites qui sont intercalées dans la houille, ou qui constituent des filons métalliques. On est presque toujours obligé d'avoir recours à des eaux de surface et à des aménagements spéciaux, sans pouvoir consacrer à l'alimentation des générateurs les eaux de l'épuisement. (Stocklet. Emploi des eaux des houillères dans les générateurs. *Revue industrielle des mines*, t. XIX, p. 432. — Le Chatelier. Alimentation avec les eaux des mines. *Annales des mines*, 3ᵉ série, t. XX. — Haton de la Goupillière. *Cours d'Exploitation des mines*, t. II, p. 232.)

eaux. Elles présentent l'inconvénient de rendre l'ébullition mousseuse, et en même temps l'avantage d'agir sur les dépôts terreux à la manière des désincrustants.

La question principale concerne les sels alcalino-terreux. On distingue sous ce rapport : 1° les eaux *calcaires*, très répandues dans les contrées jurassiques ou crétacées, où elles s'imprègnent de bicarbonate de chaux, à la faveur de l'acide carbonique libre qui leur permet de dissoudre le carbonate neutre; on y trouve de même le bicarbonate de magnésie, principalement dans les régions dolomitiques; 2° les eaux *séléniteuses* provenant des terrains à plâtre, où elles se chargent de sulfate de chaux, le pire ennemi des chaudières.

Je citerai comme exemple (¹) la teneur de quelques-unes des eaux de Paris, évaluée en kilogrammes par mètre cube, ou en grammes par litre :

EAUX	CARBONATE DE CHAUX	SULFATE DE CHAUX	MATIÈRES DIVERSES	RÉSIDU TOTAL	DEGRÉ HYDROTIMÉTRIQUE
Belleville.	0,260	1,140	0,250	1,650	128
Arcueil.	0,170	0,170	0,130	0,470	28
Ourcq	0,200	0,020	0,030	0,250	30
Seine	0,120	0,030	0,020	0,170	18

1138 — On peut suivre, pour l'élimination de ces éléments, deux méthodes distinctes : l'application de la chaleur, ou les réactions chimiques.

Une élévation modérée de température détruit les bicarbonates, en laissant dégager un équivalent d'acide carbonique et précipiter les carbonates neutres.

Quant au sulfate de chaux, à l'inverse de ce qui a lieu pour l'immense majorité des substances salines, il est doué de la *solubilité inverse*, qui décroît quand la température augmente (²).

(¹) Ser. *Physique industrielle*, t. II, p. 217.

(²) Fisher et Gmélin. *Handbook of Chemistry*, t. III, p. 201. — *Dingler's polytechnisches Journal*, t. CCXII, p. 208.

Soluble dans 393 parties d'eau à 35 degrés, il devient [1] insoluble vers 150 degrés.

Il suit de là que, dans une chaudière composée d'un corps cylindrique, de bouilleurs et de réchauffeurs, la majeure partie du sulfate de chaux se réunira dans celle de ces enceintes qui approchera de cette dernière température. De là aussi l'utilité du collecteur-réchauffeur d'alimentation qui figure dans la plupart des chaudières tubulées (n° 1044), et qui est destiné à recueillir la majeure partie des dépôts avant l'admission dans des tubes étroits, dont le nettoyage deviendrait sans cela trop difficile.

1139 — *Réactions chimiques.* — L'emploi des moyens chimiques [2] est des plus simples, en ce qui concerne les principes mis en jeu; mais il rencontre, pour son application industrielle en grand, des difficultés pratiques assez sérieuses [3]. Il y a lieu de distinguer à cet égard : 1° la réaction qui détermine la précipita-

[1] Bien que le fait soit contesté.

[2] Carcenat et Derennes. Note sur l'épuration préalable de l'eau d'alimentation, etc. *Mémoires de la Société des Ingénieurs civils*, 1891. — Delebecque. *Rapport sur l'épuration des eaux d'alimentation des chaudières à vapeur*, in-8°, Lille, 1885. — Forquenot. *Mémoires de la Société des Ingénieurs civils*, 20 février 1874. — Asselin. *Ibidem*, 21 février 1879. — Closson. *Ibidem*, juin 1880, p. 771. — Richard. *Revue générale des chemins de fer*, 1881, 2e sem., 245. — *Congrès des Ingénieurs en chef des Associations de Propriétaires d'appareils à vapeur*, Lille, 1876, p. 51; Bruxelles, 1877, p. 136; Rouen, 1879, p. 127; Lyon, 1880, p. 64. — *Revue universelle des mines et de la métallurgie*, t. XXXV, p. 632; 1878, t. III, p. 508; 1879, t. V, p. 601.

Rogers. Incrustation in steam boilers. *Mechanic's magazine*, 26 octobre 1872. — Kirhwood. *Report on the filtration of rivers water*, 1 vol. — Humber. *Treatise on water supply*. 1 vol. — Baldwin Latham (*Sanitary Engineering*, 1 vol. — On the Softening of water. *Society of arts*, 25 juillet 1884).

[3] Épurateurs : Anderson (*Revue industrielle*, 28 juin 1882. — Devonshire. *La purification des eaux par le fer métallique dans le purificateur rotatif d'Anderson*. Traduction Kemna, in-8°, Gand 1880. — *Minutes of Proceedings of the Institution of civil Engineers*, LXXXI, part. III. — *Journal of Society of arts*, 26 novembre 1886). — Blessing. *American machinist*, 4 décembre 1886, p. 1. — Bosse. *Mechanic's Magazine*, 26 mai 1871. — Carroll (*Annales industrielles*, septembre 1889, p. 277. — *La Nature*, 20 juillet 1888, p. 117). — Dehors. *Chronique industrielle*, 9 janvier 1887, p. 15. — Derscham. Ser. *Physique industrielle*, t. II, p. 226. — Farquhar et Oldham. *Institution of Mechanical Engineers*, février 1881. — Fourcy, Chenot et Guary. *Revue industrielle*, 14 mai et 15 octobre 1884, 3 septembre 1885. — De Gassicourt. *Bulletin de la Société d'encouragement*, t. XVI. — Glépin. *Revue industrielle des mines et de la métallurgie*, t. XXXII, p. 80. — De Haen (Delaunay. *Les chaudières à haute pression*, p. 50. — *Royal Society of London*, t. XXII, p. 173, 483. — *Journal of the chemical Society*, n° 161, p. 799). — Holliday. *Engineering*, 1er juillet 1881. — Hyatt. *Scientific american*,

tion des substances nuisibles; 2° le décantage destiné à séparer les précipités de l'eau clarifiée et dorénavant prête pour l'alimentation.

Les réactions mises en œuvre doivent être nettes, rapides, économiques. Il serait désirable que les réactifs pussent se précipiter en même temps que les matières qu'ils sont destinés à fixer, de manière qu'il ne restât théoriquement rien en dissolution (¹). Si la double décomposition doit au contraire laisser l'un de ses produits dans la liqueur, il est indispensable que ce dernier ne soit plus susceptible d'entartrer les chaudières, et qu'il puisse être enlevé par un simple lavage. Quant au précipité, il doit se séparer nettement et assez rapidement. L'addition des réactifs s'effectue d'après des essais quantitatifs suffisamment précis pour qu'on ne risque pas d'en introduire un excès, qui serait tout à la fois coûteux et directement contraire au but à atteindre.

1140. — On emploie un lait de chaux pour saturer les bicarbonates, et les précipiter à l'état de carbonates neutres.

Les eaux séléniteuses sont additionnées de carbonate de soude, qui précipite le carbonate de chaux et laisse en dissolution du sulfate de soude.

Les sels de baryte sont d'un effet très net, en raison de la complète insolubilité du sulfate de baryte. On peut se servir d'azotate de baryte ou de chlorure de baryum. L'azotate de chaux ou le chlorure de calcium produits par la double décomposition restent en dissolution. Mais le chlorure de baryum est cher et vénéneux. En outre, en présence des sels de magnésie, il donne naissance à du chlorure de magnésium, capable d'attaquer la tôle. L'eau de baryte paraît donner de bons résultats.

1er, 31 mars, 21 juin 1884. — Jacquier et Danek. *Les progrès de l'Industrie*, t. I, pl. 35. — Johnson. *The Iron*, 5 novembre 1880. — Lacroix. *Propagation industrielle*, janvier 1868. — Lelogé. *Bulletin de la Société d'encouragement*, t. XXX, p. 171. — Lenllyn et James. *Mechanic's magazine*, 8 juin 1872. — Maignen. Richard. *La chaudière locomotive*, in-4°, p. 343. — Needham et Kite. *Mechanic's magazine*, 14 octobre 1871. — Peacok. *Annales des arts et manufactures*, t, XVIII, p. 303. — Perret (*Revue industrielle*, 21 mars 1883. — *The Engineer*, 9 février 1877). — Pinchon. *Bulletin de la Société industrielle d'Elbeuf*, 1885, n° 1, p. 27.

(¹) Bien qu'en pratique il subsiste ordinairement une certaine teneur, marquée par 4 à 6 degrés de l'hydrotimètre.

On a essayé l'eau de savon, qui précipite un savon de chaux en laissant dans la liqueur un sulfate alcalin soluble.

1141 — *Décantage.* — Un brassage énergique est indispensable, afin d'assurer une complète réaction mutuelle des éléments. Le repos doit lui succéder, pour préparer le dépôt des produits. Si l'on peut facilement disposer d'une grande superficie horizontale, on emploie deux bassins conjugués [1], dont l'un est en nettoyage pendant le fonctionnement de l'autre.

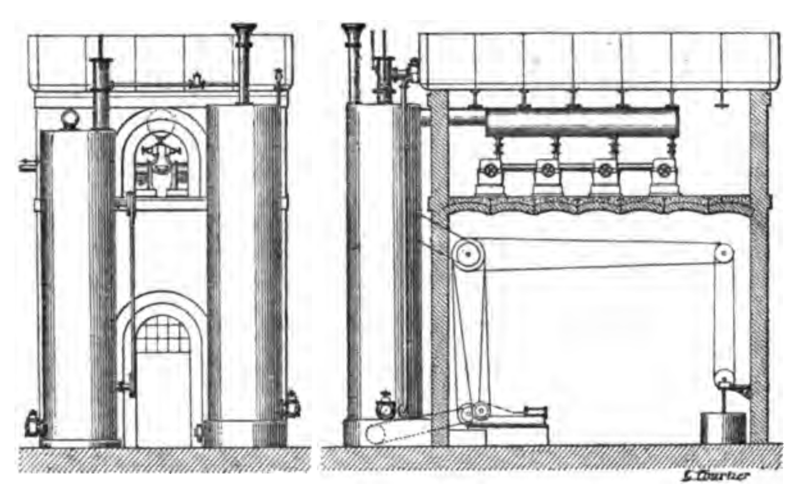


Fig. 705 et 706. — Épurateur Clarke, Atkins et Porter (élévations antérieure et latérale).

Mais dans les centres industriels, la place manque souvent, et l'on a imaginé, en vue de ce cas, certains appareils dans lesquels s'effectuent successivement les diverses opérations. L'eau s'y trouve traitée par le réactif approprié; des agitateurs favorisent le mélange, puis la clarification s'effectue au moyen de nombreux diaphragmes entre lesquels circule le liquide, en abandonnant dans chaque compartiment une partie du précipité qui ne sera plus reprise, et dont on se débarrassera par des purges périodiques.

On se sert également de filtres-presses pour activer et parachever la séparation.

[1] Voy. t. I, p. 500, note 2.

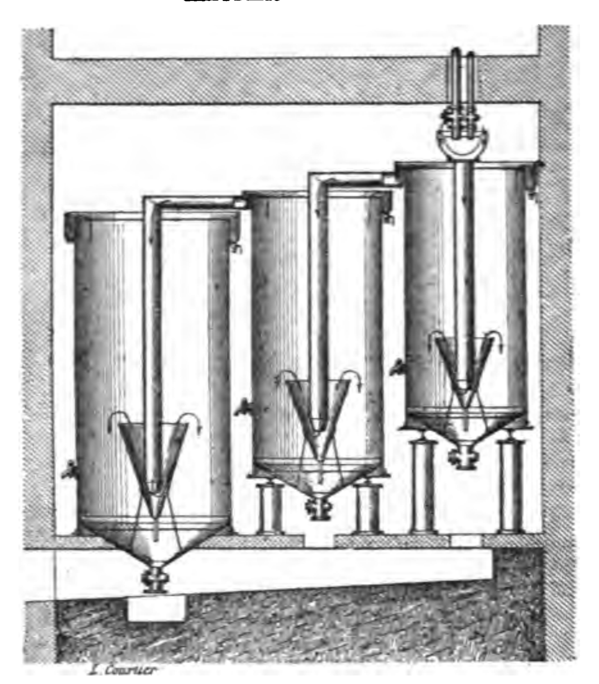


Fig. 707. — Épurateur Béranger et Stingl (coupe verticale).

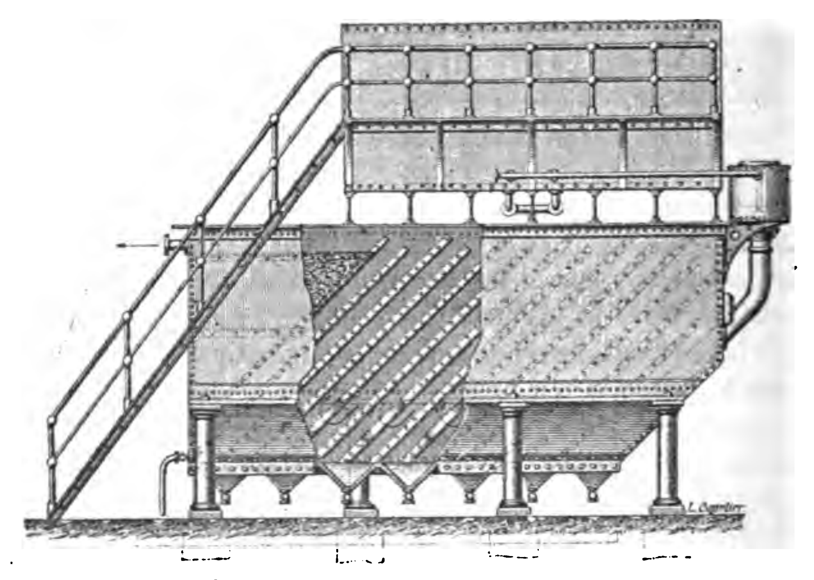


Fig. 708. — Épurateur Paul Gaillet. Type horizontal (coupe et élévation).

Avec le système Letellier ([1]), l'eau arrive sous pression dans la tuyère d'un injecteur en même temps que le réactif. Le mélange se trouve projeté au milieu d'une enceinte. où se trouvent des filtres

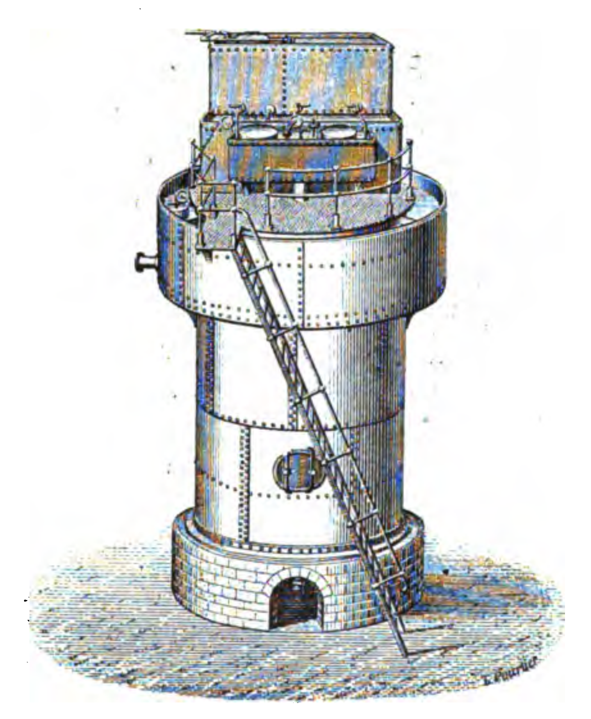


Fig. 709. — Épurateur Paul Gaillet. Type vertical (vue perspective).

formés de tubes percés de trous et environnés de feutre, que l'eau est obligée de traverser.

Je citerai comme exemple de ces diverses combinaisons (fig. 705, 706) le système Clark, Atkins et Porter ([2]), l'appareil Howatson ([3]), le décanteur Desrumeaux ([4]), ainsi que (fig. 707) le procédé Béranger et Stingl ([5]), et les deux appareils

([1]) Péclet. *Traité de la chaleur*, t. II, p. 125. — Richard. *La chaudière locomotive*. in-4°, p. 346.

([2]) *Ibidem*, p. 340. — *The Engineer*, 17 décembre 1880, 18 février 1881.

([3]) Rapport Hirsch. *Bulletin de la Société d'encouragement*, 4e série, t. VII, p. 57.

([4]) *Génie civil*, t. XX, p. 385.

([5]) *Revue industrielle*, juin 1874. — Couche *Voie, matériel roulant, exploitation*

de M. Paul Gaillet [1], l'un horizontal (fig. 708), l'autre vertical (fig. 709).

§ 6

DÉSINCRUSTANTS

1142 — Si l'on renonce à débarrasser préalablement les eaux d'alimentation des substances qu'elles renferment en dissolution, il reste encore la ressource d'empêcher les dépôts de se prendre en masse solide adhérente au métal, et de les maintenir sous la forme d'une bouillie liquide facile à nettoyer. C'est le rôle des *désincrustants* [2], dont on a proposé un très grand nombre.

technique des chemins de fer, t. III, p. 195. — Ser. *Physique industrielle*, t. II, p. 223. — Hirsch et Debize. *Leçons sur les machines à vapeur*, t. I, p. 942. — *Quatrième Congrès des Ingénieurs en chef des Associations de Propriétaires d'appareils à vapeur*, Rouen, 1881, p. 127. — Bour. *Cinquième Congrès*, Lyon, 1881, p. 64.

[1] *Revue technique de l'Exposition de* 1889, 6e partie, t. I, p. 396. — Richard. *La chaudière locomotive*, p. 343.

[2] Désincrustation par le tannin. *Chronique industrielle*, 3 juillet 1887, p. 306. — Emploi du sucre comme désincrustant. *Compte rendu mensuel des séances de la Société de l'Industrie minérale de Saint-Étienne*, 1889, p. 15. — Emploi du talc comme désincrustant. *Génie civil*, t. XVIII, p. 159. — Aspirateur pour désincrustant. *La Meunerie française*, 1888, p. 427. — Dulac. Désincrustation (*Revue industrielle*, 4 janvier 1882, p. 3. — *Mémoires de la Société des Ingénieurs civils*, 1852, p. 291 ; 20 février 1874 ; août 1883, p. 148). — Kuhlmann. *Utilité des carbonates alcalins pour éviter l'incrustation des chaudières*, 1841, Paris. — Davis. *Traité des incrustations des machines à vapeur, et moyen d'empêcher la formation des écailles*. — Pistre. Emploi de l'huile lourde pour prévenir les incrustations. *La Nature*, 19 février 1880, p. 182. — Goudronnage des chaudières (Abé. *Compte rendu mensuel des séances de la Société de l'industrie minérale de Saint-Étienne*, 1880, p. 127 ; 1881, p. 29 ; juin 1877, p. 22. — *Annales industrielles*, 10 décembre 1871 ; 12 octobre 1890, p. 462. — *La Nature*, 19 février 1881). — Extrait de campêche. *Bulletin technologique de la Société des anciens Élèves des Écoles d'arts et métiers*, juillet 1889, p. 555. — Emploi du coaltar. *Annales industrielles*, 10 décembre 1871, p. 1100. — Richard (*Revue générale des chemins de fer*, 1881, 2e semestre, p. 252. — *La chaudière locomotive*, in-4°, p. 329). — Couche. *Voie, matériel roulant, exploitation technique des chemins de fer*, t. III, p. 199. — *Revue universelle des mines et de la métallurgie*, 2e série, t. XVIII, p. 250 ; XXVII, p. 368. — *Chronique industrielle*, 3 mars 1888, p. 117. — *Journal des fabricants de papier*, p. 238. — *Revue industrielle*, 13 octobre 1887, p. 408. — *La Métallurgie*, 9 novembre 1889, p. 1383. — *Portefeuille économique des machines*, 3e série, t. VIII, p. 89.

Napier. On desincrustants. *Philosophical Society of Glasgow*, t. IV. — Burfite. *Journal of the chemical Society*, janvier 1876, p. 73. — Hayes. *Association der Master Mechanics*, mai 1879. — Elsner. *Zusammenstellung der bisher angewendeten Mittel die Entstehung des Kesselsteins*, Berlin, 1854, in-8°. — *Rivista di artiglieri e genio*, 1884.

Quelques-uns de ces agents, dont la composition est formulée en vue de conditions déterminées, peuvent rendre d'utiles services. Cependant un grand discrédit s'est attaché en général à ce genre de produits, que le commerce présente trop souvent, sous des noms plus ou moins excentriques, comme convenant indifféremment à tous les cas; prétention évidemment inadmissible (1).

On peut même assurer que plusieurs de ces substances risquent d'être nuisibles dans certaines conditions, et qu'il y a toujours quelque danger à employer des matières dont la composition reste inconnue (2). Par exemple des mélanges acides attaqueront le métal; des corps gras peuvent préparer les inconvénients dont nous avons parlé ci-dessus (n° 1131); des substances solides ou pâteuses exposent à l'encombrement des tubes dans les chaudières à petits éléments. Ces obstructions pourront amener des coups de feu. Il en est de même du goudronnage intérieur, qui demande à être appliqué avec certaines précautions. Dans tous les cas, la masse du désincrustant s'ajoute, dans les dépôts, à celle des matières précipitées.

1143 — Les éléments qui paraissent jouir de quelque efficacité, et qui entrent le plus souvent dans la composition de ces mixtures, sont en général des matières organiques. Je citerai par exemple : le bois de campêche, les mélasses de sucreries, le tannin, la noix de galle, l'amidon, les pelures de pommes de terre, des sacs de son, la glycérine, le goudron, les résidus de pétrole, le tannate, l'ulmate, le carbonate de soude. La fécule, la gélatine, le varech (3), ont une action peu sûre.

(1) *Antitartre* Main. — *Glu antitartrique* Gérard. — *Liquide antitartrique.* — *Nihiltartre* Roux. — *Paratartre* Magnet. — *Tartrifuge* Nivet. — *Tartriphage* Constant. — *Tartrivore.* — *Parasel* Gissler. — *Anticalcaire* Froideville. — *Anti-incrustant.* — *Désincrustateur* Pistre. — *Désincrustant* Perinbert. — *Désincrustant à la mélasse* Sumac. — *Extrait végétal désincrustant.* — *Liquide végétal.* — *Végétalin* Lecourt. — *Végétaline.* — *Lithophage.* — *Lithoréactif* Weiss. — *Trisodium phosphate* Saint-Arnaud. — *Coagulateur* Mertz. — *Poudre* Alfiéri. — *Calciracine* Soultz. — *Hydrhyaline* Égrot et Tincq. — *Capnomore* Raby et Villain, etc.

(2) Olry. Note sur les dangers de l'emploi des désincrustants (*Annales des mines*, 8e série, t. XVIII, p. 628. — *La métallurgie*, 10 juin 1891, p. 884).

(3) Ledieu. *Nouvelles machines marines*, t. III, p. 405.

On a dû abandonner l'oxalate de soude, le borax, la plombagine, le talc, l'argile [1], le sable, le verre pilé, la sciure de bois. Il en est de même de l'emploi direct de l'électricité [2].

On attribue cependant quelquefois à cette dernière l'efficacité, qui paraît sérieuse, d'un réactif assez inattendu en pareille matière : à savoir le zinc métallique [3]. On admet aussi que les bulles de gaz développées par la décomposition de l'eau, sous l'influence de ce métal plus oxydable que le fer, empêchent les dépôts de s'agglutiner. Ce moyen réussit particulièrement avec l'eau de mer. Il est propre, peu gênant, assez économique. On peut ultérieurement refondre comme vieux zinc les résidus. Le métal est employé en plaques minces placées au contact de la tôle.

§ 7

ENTRETIEN

1144 — *Vidange.* — Une tubulure est insérée au point le plus bas du générateur, pour permettre de le mettre à sec [4]. La vidange doit toujours être complète. Les flaques d'eau qui resteraient dans l'intérieur deviendraient une cause d'oxydation. Pour ce motif, on

(1) Pelouze. *Manuel du manufacturier.*

(2) *Journal universel d'électricité*, 27 février 1886, p. 411. — *La lumière électrique*, t. XIII, p. 121. — *Génie civil*, t. VI, p. 274. — *Mémoires de la Société des Ingénieurs civils*, 1868, p. 74 ; 1870, p. 80, 83. — Ledieu. *Nouvelles machines marines*, t. III, p. 407.

(3) Canon. Protection des chaudières par le zinc (*Moniteur industriel*, 19 novembre 1886, p. 366. — *Revue universelle des mines et de la métallurgie*). — Emploi du zinc comme désincrustant. *Inventions nouvelles*, 20 novembre 1886, p. 669. — Brossard de Corbigny. *Annales des mines*, 7e série, t. XII, p. 155. — Lesueur. *Annales de chimie et de physique*, septembre 1875. — *Bulletin de la Société d'encouragement*, 3e série, t. III, p. 55; V, 150. — *Revue industrielle*, 1884, p. 107. — *Génie civil*, t. VI, p. 332. — *Revue scientifique*, 1886, t. II, p. 669. — *Comptes rendus mensuels des séances de la Société de l'Industrie minérale de Saint-Étienne*, octobre 1875, p. 10, 14. — *Écho des mines et de la métallurgie*, 26 décembre 1886. — *Les Mondes*, t. XLIV, p. 510. — Bienaymé. *Les machines marines*, p. 507. — Hirsch et Debize. *Leçons sur les machines à vapeur*, t. I, p. 950. — Instruction de l'Amirauté anglaise. *Revue maritime et coloniale*, décembre 1874.

Swinburnking. *Scientific american supplement*, 5 juillet 1884, p. 7080. — King. Electrogène. Zinc to prevent boiler incrustations. *Society of Arts*, mai 1884.

(4) Perret. Séparation de l'eau et de la vapeur pendant la vidange. Rapport Pihet. *Bulletin de la Société d'encouragement*, avril 1888, p. 165.

donne au corps cylindrique et aux bouilleurs une légère inclinaison.

On laisse écouler l'eau sous une faible pression, afin de chasser, s'il se peut, une partie des boues. Si la chaudière est enterrée, elle se vide comme un siphon d'eau de Seltz, à l'aide d'un tube qui remonte du fond jusqu'au niveau du sol. L'eau franchit cette dénivellation en raison de la pression qu'on laisse dans ce but à la vapeur. Il serait cependant dangereux de vider le générateur à chaud. Une température élevée risquerait, après le départ du liquide, de calciner les boues.

1145 — *Nettoyage extérieur.* — Les nettoyages de la surface externe des récipients sont nécessaires pour remettre au vif les surfaces métalliques, et les rendre plus aptes à la convection de la chaleur. Le noir de fumée et les cendres ont en effet une conductibilité 400 fois moindre que celle du fer, et 1000 fois moindre que celle du cuivre ([1]).

En outre, les ramonages ont pour résultat de supprimer une cause active de corrosion (n° 941, note 1), à savoir l'occlusion des vapeurs sulfuriques dans les suies, ou les cendres fines qui ont été entraînées.

On balaye les carneaux, on écouvillonne les tubes à fumée, on emploie des jets de vapeur ou des lances d'eau pour atteindre les parties inaccessibles.

Une surveillance attentive doit s'exercer en outre sur tous les organes spéciaux : robinets, soupapes, etc.

1146 — *Nettoyage intérieur.* — Les nettoyages intérieurs sont encore plus essentiels que les précédents au point de vue de la sécurité. Leur principal objet est l'enlèvement des dépôts. Deux cas peuvent se présenter, suivant que ceux-ci se trouvent à l'état de bouillie liquide ou de tartre consolidé.

Le nettoyage des boues ([2]) doit avoir lieu, suivant la nature des

([1]) Aussi un rempart de cendres est-il un très bon isolant pour empêcher la déperdition de la chaleur au dehors (n° 1107).

([2]) Débourbeurs : ANTHONY SCOTT. Wilson. *A treatise on steel boilers*, p. 181. — BROADBENDT. *Mechanic's Magazine*, 1871, t. I, p. 236. — DERVAUX (*Revue industrielle*, 1883, t. II, p. 507. — *Engineering*, 1880, t. II, p. 529). — DUMAS GARDEUX. *Chronique in-*

eaux, tous les mois, tous les quinze jours, ou toutes les semaines. Il y aurait inconvénient à trop attendre, en dehors même des considérations de sécurité, car le primage en serait augmenté.

Pour faciliter l'enlèvement des boues, on a indiqué l'emploi de collecteurs mobiles (¹). Ce sont des capsules métalliques (fig. 710) qui épousent la courbure du corps cylindrique, et que l'on installe près du fond. La chaleur de l'enveloppe extérieure établit dans le bain liquide une circulation ascendante le long des parois. Le courant redescend avec plus de lenteur vers la région centrale. Dans cette chute verticale, les troubles rencontrent le collecteur, et y restent en grande partie. On retire ces récipients, avec quelque difficulté d'ailleurs, et on les remplace par d'autres.

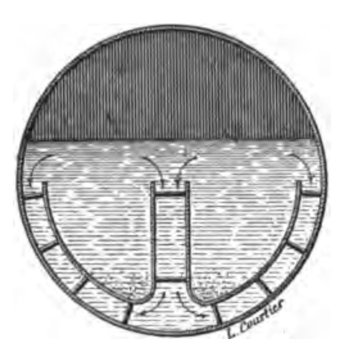


Fig. 710. — Capsule collectrice. (Coupe verticale).

1147 — L'enlèvement des tartres est plus difficile. Aussi doit-on chercher à empêcher autant que possible les dépôts de s'agglomérer sous cette forme. Nous avons vu comment, en dehors de l'action des désincrustants, on y parvient dans les chaudières tubulées par l'introduction d'un collecteur-éboueur (n° 1044), et dans les générateurs à corps cylindrique par l'emploi de réchauffeurs (n° 1108), qui ne sont pas soumis à l'action directe des flammes.

dustrielle, 29 mai 1887, p. 241. — Duméry. Résal. *Mécanique générale*, t. IV, p. 146. — Fergusson. *Scientific american*, 5 décembre 1885, p. 356. — Germain. *Revue industrielle*, 31 janvier 1883, p. 45. — Hargreaves. *Mechanic's Magazine*. 1872, t. I, p. 387. — Holcroft et Heyle. Claudel. *Aide-Mémoire*, p. 601. — Hotchkiss (*La Nature*, 29 janvier 1881, p. 140. — *American machinist*, 7 novembre 1885, p. 3). — Mack. *Engineering*, 1871, t. I, p. 196. — Popper. *Propagation industrielle*, septembre 1879. — Schmitt et Halwell. Péclet. *Traité de la chaleur*, t. II, p. 406. — Sigl. *Engineering*, 1870, t. I, p. 72. — Sim. *Chronique industrielle*, 30 juin 1889, p. 288. — Vanduzen. *American machinist*, 30 janvier 1886, p. 5.

(¹) Capsules : Dulac (*Revue industrielle*, 1880, p. 293; 1882, p. 28. — *Portefeuille économique des machines*, 1882, p. 188; 1884, p. 1. — *Revue technique de l'Exposition de* 1889, 6ᵉ partie, t. I, p. 77). — Schwitz (Hirsch et Debize. *Leçons sur les machines à vapeur*, t. I, p. 937. — Richard. *La chaudière locomotive*, p. 336).

Avec un corps cylindrique unique, on peut partager sa longueur en deux parties par une cloison verticale, qui n'atteint pas tout à fait le niveau du liquide, de manière à laisser les deux biefs en communication. On alimente dans celui des deux qui se trouve le plus éloigné du coup de feu. La température y est suffisante pour précipiter la majeure partie des sels, et cependant elle n'atteint pas l'intensité qui rendrait probable leur calcination.

1148 — Lorsque l'entartrement est effectué, il devient nécessaire de *détartrer* la chaudière. Nous avons vu (n° 1023) comment on s'y prend pour les tubes de fumée, et quelles difficultés on rencontre à cet égard.

Pour les corps cylindriques ou les bouilleurs, un ouvrier s'introduit par le trou d'homme. Il opère le *piquage* des incrustations à l'aide du burin et du marteau. Cette opération doit être faite avec une grande précaution, car le ciseau pourrait offenser le métal, dont les blessures seraient de nature à préparer ultérieurement des accidents.

Ces opérations, fréquemment répétées, fatiguent toujours les générateurs. On a observé dans la marine qu'un accroissement sensible de durée a coïncidé avec la substitution à l'ancien état de choses, de l'alimentation avec l'eau distillée.

On doit affecter au piquage des hommes habiles et consciencieux, car leur besogne est pénible et son contrôle difficile.

1149 — On a proposé pour l'enlèvement des concrétions l'usage des acides. Ce moyen est en effet radical, mais doit être absolument proscrit, comme susceptible d'attaquer la tôle, sans qu'il soit possible de limiter son action.

On emploie quelquefois aussi une manœuvre extrêmement nuisible, en provoquant des refroidissements brusques, pour déterminer dans le métal des contractions rapides, qui n'étant pas suivies par la couche pierreuse, beaucoup moins conductrice, déterminent le fendillement de cette dernière, et facilitent ainsi son enlèvement par écailles. Une telle opération tourmente la tôle, fatigue les assemblages, et prépare à brève échéance la mise

hors de service. On doit conseiller au contraire d'effectuer les lavages à l'eau chaude.

Cet effet se produit d'ailleurs de lui-même, lorsque l'on vient à soumettre un générateur au régime d'un bon désincrustant. On voit alors disparaître peu à peu les anciens tartres.

1150 — Lorsque le nettoyage extérieur est terminé, on enduit les surfaces de plombagine, afin de diminuer leur adhérence pour les incrustations.

Il est d'une grande importance, au moment où l'ouvrier sort de la chaudière, qu'il veille attentivement à n'y rien laisser. Un outil, un chiffon de nettoyage, une pierre de flotteur, en empêchant le contact de l'eau, peuvent déterminer sur ce point un coup de feu, une soufflure, qui rendront bientôt une réparation indispensable.

1151 — *Visites.* — Les visites des chaudières par un agent expérimenté doivent se succéder régulièrement ([1]). On distingue les visites extérieures ou intérieures, partielles ou totales. Pour faciliter ces dernières, on établit au besoin quelques-unes des armatures métalliques de manière à pouvoir les démonter. En outre il convient, à des intervalles périodiques, de *déshabiller* complètement la chaudière en démolissant toutes les maçonneries. Outre qu'elles risquent beaucoup, en vieillissant, d'être fendillées, humides, etc., cette opération permet d'examiner l'enveloppe dans toutes ses parties. On choisit de préférence pour cette opération l'instant du renouvellement de l'épreuve légale (n° 1189), en vue de laquelle l'ingénieur des mines a toujours le droit d'exiger cette mise à nu, bien qu'il puisse également user de tolérance à cet égard suivant les circonstances ([2]). Les Associations de propriétaires d'appareils à vapeur (n° 1191) établissent, pour leurs clients, un service périodique de visites, confié à un personnel expérimenté.

L'examen se fait à vue, avec beaucoup d'attention, et au son, en interrogeant la tôle avec le marteau, pour juger, d'après le bruit

([1]) Visites des chaudières. *La Lumière électrique*, t. XXV, p. 447.

([2]) Circulaire ministérielle du 23 août 1887.

qu'elle rend, ses diminutions d'épaisseur ou autres défauts; appréciation difficile d'ailleurs, et assez sujette à caution.

1152 — *Réparations*. — Les réparations ne doivent pas être exécutées par petites pièces, dont les dimensions deviendraient comparables à celles de la clouûre. Les feuilles seront toujours cintrées dans le sens du laminage. Une pièce rapportée doit être assemblée *en dedans*. Placée en dehors, elle briserait la flamme, et déterminerait à l'intérieur la formation d'une poche pour les dépôts.

Il est bon que les tubes soient interchangeables, de manière à permettre de les remplacer facilement à l'aide de joints à vis consolidés par des contrebagues. Cet avantage est important dans la marine, car on ne peut disposer à bord de toutes les ressources que procurent, pour les réparations, les ateliers établis à terre. Cette circonstance crée un titre de préférence en faveur des chaudières tubulées.

Si, après une réparation, les avaries se reproduisent au même endroit et de la même manière, il y a lieu de suspecter le mode de construction, qui est sans doute de nature à déterminer, par l'excès des dilatations, des fatigues abusives pour certains joints.

CHAPITRE LXI

EXPLOSIONS

—

§ 1

EFFETS DES EXPLOSIONS

1153 — *Exemples.* — Les explosions des générateurs à vapeur ([1]) prennent souvent les proportions d'une épouvantable catastrophe, tant sous le rapport des hécatombes dont elles sont l'occasion, que

([1]) *Annales des mines*, 7e série, t. I, p. 424; III, 1; IV, 28; V, 559; VI, 355; IX, 455, 463; X, 197, 201; XI, 104; XII, 490; XIII, 201, 216, 264, 279, 294, 301, 590; XIV, 68, 244, 548; XV, 313; XVII, 22; XVIII, 541, 544, 549; XIX, 48; XX, 209, 498; 8e série, II, 468, 557; III, 301; IV, 238, 249, 269; VI, 496; XII, 361; XV, 5; XVIII, 608. — Durand. Note sur les défauts des chaudières. *Bulletin de la Société de l'industrie minérale de Saint-Étienne*, 2e série, t. X, p. 51. — *Comptes rendus des séances de la Société de l'industrie minérale de Saint-Étienne*, décembre 1875, p. 10; juin 1876, p. 4; mai 1877, p. 43; 1881, p. 156. 219. — Désiré Tassin. *Explosions foudroyantes des machines à vapeur*, in-12. — Wronski. *Explosion irrésistible*, p. 49. — Hirsch. Expériences sur les coups de feu des chaudières à vapeur. *Annales du Conservatoire*, 2e série, t. I. — Compère. *Les chaudières à vapeur au point de vue de la sécurité*, in-8°, 1890. — Limonet. *Les explosions de chaudières*, in-8°. — Examen des théories des explosions. *Annales industrielles*, 1884, t. II, p. 440. — Soupapes coincées. *Revue industrielle*, 1876, p. 452. — *Bulletin du Ministère des travaux publics*, t. X, p. 366. — *Bulletin de l'Association scientifique de France*, juin 1873, p. 156; avril 1875, p. 13. — *Les Mondes*, t. XXX, p. 584; XXXVII, 712. — Delaunay. *Étude sur les générateurs à haute pression*, in-8°.

Thurston. Steam boilers as magazines of explosive energy. *Journal of Franklin Institute*, décembre 1884. — The Causes of boilers explosions. *Scientific american supplement*, 24 octobre 1891, p. 13176. — Hallet. On the Causes and Remedies of corrosions in marine boilers. *Institution of mechanical Engineers*, août 1880. — Engert. The defects of steam boilers and their remedies. *Van Nostrand's. Engineering magazine*, juin 1884, p. 234. — *Engineering*, 5 janvier 1872; 1879, 479; 1886, 277, 289, 297; 1891, p. 490; 1892, 267.

Scheffer. Expériences sur les explosions. *Organ für die Fortschritte des Eisenbahnwesens*, t. XIV, p. 141.

par les dégâts matériels qui les accompagnent (fig. 711, 712, 713). On en jugera par les exemples suivants.

Coppenanfort (Nord) ; 13 février 1864 ; 14 tués, 2 blessés (1).

Le Citis, bateau naviguant sur le Rhône avec 26 passagers ; 17 février 1841 ; 11 tués, 9 blessés (2).

Saint-Bernard (Aube) ; 19 juillet 1873 ; 12 tués, 9 blessés.

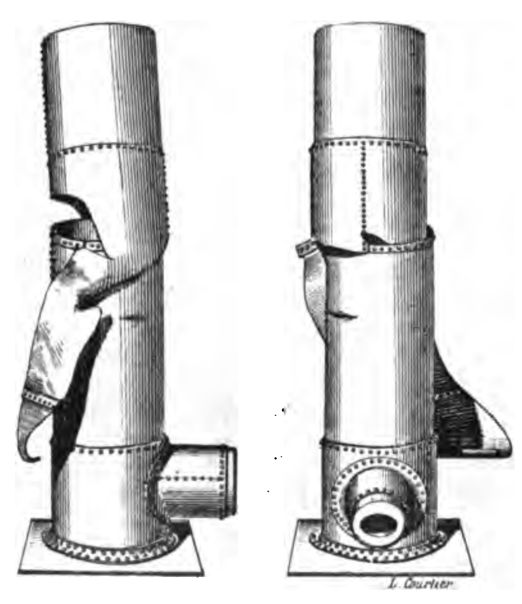


Fig. 711 et 712. — Explosion d'une chaudière verticale (élévations antérieure et latérale).

Hartford (Connecticut) ; 18 février 1889 ; 23 tués, 10 blessés (3).

Friedenshütte (Haute-Silésie) ; juillet 1887 ; une batterie de 23 chaudières chauffées au gaz des hauts fourneaux, qui ont sauté toutes ensemble ; 12 tués, 35 blessés (4).

Commentry (Allier) ; 8 septembre 1874 ; chaudières verticales métallurgiques ; 22 tués, 32 blessés.

(1) Jacqmin. *Des machines à vapeur*, t. II, p. 162.

(2) *Ibidem.*

(3) Walckenaer. *Annales des mines*, juillet-août 1889.

(4) Olry. *Annales des mines*, 1889, 2e sem., p. 5. — *Bulletin de la Société d'encouragement*, 1888, p. 430. — *Comptes rendus mensuels des séances de la Société de l'industrie minérale de Saint-Étienne*, 1888, p. 131. — *Annales des ponts et chaussées*, 1889, 2e sem., p. 195. — *Portefeuille économique des machines*, 3e série, t. XIII, p. 174.

Eurville (Haute-Marne) ; 10 novembre 1884 ; chaudières verticales métallurgiques ; 22 tués, 33 blessés [1].

Walsall (Angleterre) ; mars 1880 ; chaudières de forge ; 27 tués, 28 blessés.

Le Thunderer, cuirassé anglais, avec des chaudières neuves ; 50 tués et 30 blessés [2].

La Revanche, cuirassé ; plus de 80 personnes atteintes [3].

Marnaval (Haute-Marne) ; 31 mars 1883 ; chaudières verticales métallurgiques ; 30 tués, 61 blessés [4].

1154 — Les dégâts matériels présentent souvent des circonstances saisissantes.

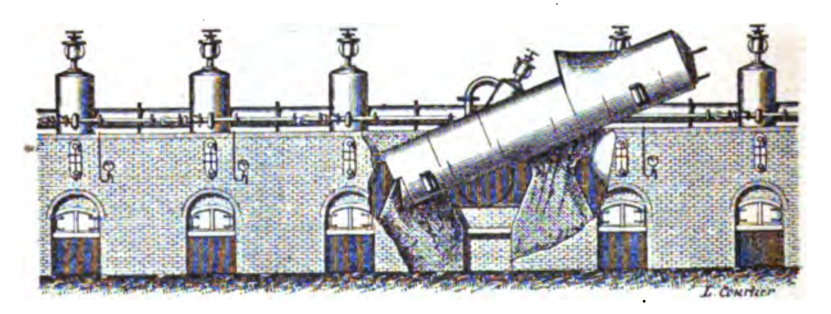


Fig. 713. — Explosion dans une batterie de chaudières horizontales (élévation).

L'explosion de Bolton qui, en 1843, a tué 18 personnes, a rasé complètement les constructions de l'usine.

Un lessiveur de la papeterie de Dvoogenbosch, près de Bruxelles, a sauté le 19 mars 1878, a traversé deux murs, dont l'un présentait un mètre d'épaisseur, et a détruit les bâtiments en ensevelissant 8 victimes sous les décombres [5].

Le navire *l'Éclaireur* a coulé à pic. Un dragueur du Rhin à Strasbourg a été coupé en deux par l'explosion de sa chaudière.

(1) *Annales des mines*, 8e série, t. VII, p. 469.
(2) *Revue industrielle*, 1876, p. 452.
(3) Delaunay. *Étude sur les générateurs à vapeur à haute pression*, p. 20.
(4) Trautmann. *Annales des mines*, 8e série, t. IV, p. 249.
(5) Delaunay. *Étude sur les générateurs à vapeur à haute pression*, p. 17.

Dans un accident du 2 janvier 1864, à Paris, une moitié du générateur a été projetée à 50 mètres de hauteur ([1]).

La locomotive Irk, de 20 tonnes, a été lancée verticalement à une hauteur de 9 mètres à travers un plancher. Elle est allée retomber à 54 mètres de distance ([2]).

La chaudière d'une locomotive du type Engerth s'est détachée de son châssis qui a continué de rouler, quoique ayant déraillé, et ne s'est arrêté qu'à 58 mètres de là. Elle s'est élancée par-dessus les fils du télégraphe, pour aller retomber à 158 mètres; elle a rebondi, et a parcouru une nouvelle distance de 36 mètres ([3]).

Dans l'explosion de la batterie de cinq chaudières d'une sucrerie du Pas-de-Calais, les maçonneries ont été rasées, et des débris lancés jusqu'à 1 000 mètres ([4]).

1155 — *Influence du volume d'eau.* — L'importance des dégâts matériels est en rapport direct avec la quantité d'eau qui se trouve renfermée dans le générateur, ainsi qu'avec la pression. Aussi est-il naturel que la réglementation publique ait pris pour base de ses classifications le produit numérique de deux facteurs, qui sont en rapport avec ces deux éléments (n° 1188).

Cette eau crée en outre un grand danger pour les hommes. Les désordres apportés par la vapeur dans les poumons, et surtout les effets des jets d'eau bouillante sont trop souvent mortels. On peut admettre approximativement que les deux tiers des décès sont occasionnés par des brûlures, et un tiers seulement par des effets mécaniques.

Réciproquement, le peu d'importance des dégâts matériels que l'on observe en certains cas, porte alors à penser, dans l'instruction qui suit un accident, que le niveau s'était abaissé peu à peu, et que le générateur ne contenait plus que peu de liquide.

1156 — L'innocuité relative des chaudières connues sous le

([1]) Jacqmin. *Des machines à vapeur*, t. II, p. 160.
([2]) *Ibidem.*
([3]) Lebleu. *Annales des mines*, 1862.
([4]) *Troisième bulletin de l'Association parisienne des Propriétaires d'appareils à vapeur.* — Delaunay. *Étude sur les générateurs à vapeur à haute pression*, p. 16.

nom d'inexplosibles repose sur le même principe. Nous avons déjà dit qu'elle ne concerne, pour cette classe d'appareils, que l'étendue des dégâts, et non leur fréquence.

En effet, non seulement le volume d'eau est alors très réduit, mais il est intelligemment disposé, et fractionné en une grande quantité de tubes, particulièrement dans le type Belleville. La chance d'avaries se multiplie à la vérité par le nombre de ces derniers, mais leur solidité est facilement surabondante. On peut donc admettre, sans prétention d'ailleurs à la rigueur, que la probabilité théorique générale d'une rupture varie peu. Mais les conséquences en seront tout à fait différentes. Le volume d'un cylindre est en effet proportionnel tout à la fois à sa hauteur et au carré du diamètre. D'une part la longueur des tubes d'une chaudière tubulée est en général beaucoup moindre que celle d'un corps cylindrique. En outre un tube de 0 m. 10 de diamètre contiendrait, sous une même longueur, 100 fois moins d'eau qu'un corps cylindrique d'un mètre, 1600 fois moins qu'un corps de 4 mètres. Il est nécessaire, à la vérité, d'ajouter que ce tube ne sera pas seul à se vider. Toute l'eau finira par sortir, mais d'une manière plus progressive, en raison de la forme compliquée de l'appareil. Il est rare qu'une rupture de tube suffise à disloquer le fourneau.

1157 — Dans les générateurs à grand volume d'eau, le mode de construction influe d'une manière générale sur les conséquences d'une rupture.

Les chaudières verticales métallurgiques sont particulièrement dangereuses. Les fragments seront nombreux, en raison de l'émiettement presque inévitable de la cheminée. Partant de si haut, ils porteront plus loin ; d'autant mieux que l'effort normal à la paroi est partout horizontal, tandis qu'avec une chaudière couchée, une grande partie des projections s'effectuera verticalement. Ces motifs peuvent expliquer, qu'au lieu d'envelopper ces générateurs de cheminées en briques formant carneau, on les munisse quelquefois de foyers intérieurs (n° 1058).

Les générateurs de Cornouailles ayant plus de chances de crever vers l'intérieur, dont l'enveloppe se trouve placée dans de moins

bonnes conditions de résistance, étendront moins loin que d'autres leurs ravages. Mais les conséquences d'une rupture sont alors particulièrement redoutables pour les chauffeurs.

Les chaudières horizontales à foyer extérieur ont leur centre de gravité à la partie postérieure, où se trouve la majeure partie du poids de l'eau. Elles ont donc chance de basculer de l'avant vers l'arrière. Il est bon, pour ce motif, de n'y pas placer directement la cheminée, qui aurait par là plus de chance d'être rasée. Il sera préférable de la mettre sur le côté, près de l'avant.

1158 — *Appréciation numérique.* — Il est facile de préciser la notion de l'influence du volume d'eau, et de se rendre compte numériquement de l'énorme accumulation d'énergie destructive qui se trouve tenue en bride dans une chaudière à grand volume, et subitement déchaînée au moment de sa rupture [1].

Appelons à cet effet p la tension, et θ la température correspondante [2]. La chute que subira cette pression pour atteindre celle du baromètre déterminera un abaissement thermométrique $\theta - 100$, et mettra en liberté un nombre égal de calories par kilogramme de liquide. Pour volatiliser l'un de ces derniers à l'air libre [3], il faut (n° 477) employer un nombre de calories r_{100}, qui a pour valeur 536,30. Le poids total qu'il est possible de réduire en vapeur est donc :

$$\frac{\theta - 100}{536,3}.$$

Son expansion exercera un travail extérieur dont l'équivalent calorifique est $\left(\frac{pu}{E}\right)_{100}$, c'est-à-dire 40,092 calories, qui représentent le nombre de kilogrammètres : $424 \times 40,092 = 16\,999$. On

[1] Rankine (*Philosophical magazine*, novembre 1883. — *The Engineer*, 11 novembre 1870). — Thurston. *Ibidem*, 3 juillet 1885 — Callon. *Cours de machines*, t. II, p. 465.

[2] Voy. t. I, p. 771.

[3] Hypothèse qui n'est à la vérité qu'approximative.

développe donc enfin, *pour chaque kilogramme liquide* enfermé dans la chaudière, le travail :

$$16\,999\,\frac{\theta - 100}{536,3} = 31,696\,(\theta - 100).$$

1159 — En désignant par m ce nombre de kilogrammètres, on voit que l'énergie disponible *totale* serait capable théoriquement d'élever tout le contenu à la hauteur de m mètres. En d'autres termes, elle représente l'écrasement vertical que produirait cette même masse, en tombant d'une telle hauteur.

Si l'on veut encore une autre image, on remarquera que la vitesse produite par une pareille chute aurait pour expression :

$$\sqrt{2gm} = 24,936\,\sqrt{\theta - 100}.$$

L'énergie disponible serait donc comparable (en faisant abstraction de sa dissémination dans diverses directions) au choc qu'exercerait le contenu de la chaudière lancé avec cette vitesse.

1160 — Établissons enfin un dernier rapprochement avec les effets de l'artillerie actuelle. Sa vitesse pratique v, estimée en mètres par seconde, oscille suivant les circonstances entre les limites extrêmes :

$$v' = 450, \qquad v'' = 900.$$

Si l'on veut connaître le poids P qui devrait être lancé avec cette vitesse v pour posséder la force vive ci-dessus, il faut, en représentant par Π le contenu de la chaudière, poser l'égalité :

$$\frac{1}{2}\,\frac{P}{g}\,v^2 = m\Pi,$$

$$P = \frac{2gm\Pi}{v^2} = 621,799\,\frac{\Pi(\theta - 100)}{v^2};$$

ce qui donne pour les deux limites en question :

$$P' = 0,003\,042\,\Pi(\theta - 100),$$
$$P'' = 0,000\,768\,\Pi(\theta - 100).$$

Les projectiles usuels qui correspondent respectivement aux vitesses v' et v'' pèsent ordinairement $8^{kg},5$ ou 780 kilogrammes. Les nombres de projectiles de ces deux sortes renfermés dans les poids correspondants P′ et P″ seront donc :

$$n' = \frac{P'}{8,5} = 0,000\,358\,\Pi(\theta - 100),$$

$$n'' = \frac{P''}{780} = 0,000\,001\,\Pi(\theta - 100),$$

en fonction des deux éléments Π et θ qui caractérisent le travail potentiel enfermé dans la chaudière.

1161 — Imaginons, pour fixer numériquement les idées, un timbre de 4 kilogrammes seulement, ce qui est très modéré. La pression p sera de 5 kilogrammes par centimètre carré, correspondant à la température :

$$\theta = 150^{\circ},99.$$

L'énergie m déployée en travail extérieur par chaque kilogramme de liquide devient :

$$m = 1\,616^{kgm},18.$$

Les poids lancés avec les vitesses v' et v'' sont respectivement :

$$P' = 0,155\,\Pi, \qquad P'' = 0,039\,\Pi;$$

et les nombres correspondants des projectiles des deux types :

$$n' = 0,01825\,\Pi, \qquad n'' = 0,00005\,\Pi.$$

Si nous envisageons, en second lieu, un timbre de 9 kilogrammes, qui est encore notablement inférieur à la pratique des chemins de fer, la pression sera de 10 kilogrammes, et l'on aura :

$$= 178^{\circ},89.$$

$$m = 2\,500^{\text{kgm}},17.$$

$$P' = 0{,}240\,\Pi, \qquad P'' = 0{,}061\,\Pi;$$

$$n' = 0{,}02824\,\Pi, \qquad n'' = 0{,}00008\,\Pi.$$

Pour nous en tenir définitivement au nombre n', on voit que chaque mètre cube d'eau renfermé dans le générateur équivaut alors théoriquement à une décharge de 28 projectiles de champ de bataille.

Imaginons, par exemple, un corps cylindrique de 1 mètre de diamètre, terminé par deux hémisphères, avec des génératrices de 10 mètres de longueur. Supposons-le rempli à moitié et timbré, comme il a été dit, à 9 kilogrammes. Il représentera, dans ces conditions, l'équivalent de 236 semblables projectiles.

On se figure dès lors quelle peut être l'étendue des ravages exercés. Que serait-ce donc pour les batteries de semblables générateurs qu'on laissait autrefois en libre communication, avant le règlement qui a exigé (n° 1194) leur isolement respectif par des clapets de retenue?

§ 2

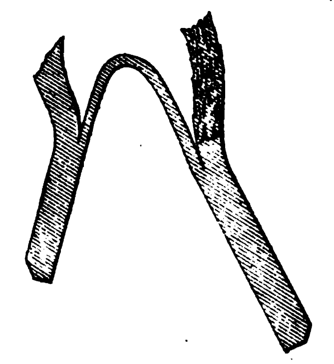
CAUSES D'EXPLOSIONS

1162 — *Généralités.* — La cause essentielle des explosions est toujours la même : c'est la disproportion entre la pression intérieure et la résistance de l'enveloppe, soit que la première se soit élevée abusivement, soit que celle-ci ait diminué progressivement ou accidentellement. A la vérité, un tel énoncé avance peu la question, et ce sont précisément les motifs de cette déséquilibration qu'il importe d'analyser en détail, afin de pouvoir se tenir en garde

contre eux. C'est en réalité à eux que se rapporte dans l'usage l'expression de *causes d'explosion*.

On peut les rattacher à quatre ordres principaux : 1° *défauts d'établissement*, provenant de la faute plus ou moins lourde du constructeur; 2° *défauts d'entretien*, dont la responsabilité incombe au personnel de l'usine, depuis la direction, qui doit assurer un service régulier de visites, et veiller à ce qu'il soit remédié sans retard aux défectuosités relevées, jusqu'aux agents en sous-ordre ou aux simples ouvriers chargés des détails de ces visites ou de ces réparations; 3° *défauts de fonctionnement*, comprenant toutes les irrégularités du service quotidien des chauffeurs; 4° *causes fortuites*, que rien ne pouvait faire prévoir, et qui n'engagent aucune responsabilité.

1163 — *Défauts de construction*. — Si la tôle est *aigre*, elle rompt sans prévenir et ses fragments volent en éclats [1]; avec une ductilité suffisante, au contraire, le métal avertit en général de l'approche du danger par des fuites croissantes, puis il se déchire, quelquefois sans projection. Il peut même arriver alors que la sortie des fluides soit assez progressive pour restreindre les conséquences du désastre.


Fig. 714. — Paille.

La concurrence commerciale, tous les jours plus active, porte malheureusement certains constructeurs à faire, sur le choix du métal, des économies bien mal entendues. Sa résistance statique et sa douceur doivent être vérifiées par les moyens en usage. Sa résistance vive mérite également d'être prise en considération.

Il est nécessaire d'ajouter que certains fers, originairement recommandables, deviennent aigres avec le temps

[1] La température extérieure semble exercer une certaine influence à cet égard, et les explosions de locomotives paraissent plus fréquentes aux États-Unis en hiver qu'en été (*Railroad Gazette*, 23 janvier 1880).

En dehors de sa qualité générale, la tôle risque de présenter des défauts locaux tels que les *pailles* (fig. 714), ou les *dédoublures* (fig. 715) qui, en interrompant la conductibilité, préparent des coups de feu sur lesquels nous reviendrons dans le paragraphe 3.

1164 — Un bon métal n'est pas toujours bien mis en œuvre. Le *cintrage en travers* prépare des criques (n° 975). Une *épaisseur trop faible* crée un danger encore plus immédiat.

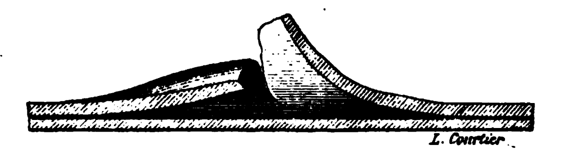


Fig. 715. — Dédoublure.

Le constructeur peut employer de *mauvaises proportions générales*, des *armatures insuffisantes*, des *congés d'emboutissage trop raides*, des combinaisons qui font naître des *dilatations contrariées*, des *difficultés pour le matage des joints*, des *impossibilités de nettoyage*, des *nids de tartre*, des *chambres de vapeur*, des tendances aux *coups de feu*, des *coincements* de soupapes ou de tiges de flotteurs, etc.

On rencontre également dans l'exécution, des *métaux écrouis* par le poinçonnage, de *mauvaises rivures*, des *malfaçons dans les assemblages de tôle sur fonte*, etc.

1165 — *Défauts d'entretien.* — Parmi les causes de dangers se rattachant à l'entretien, je rappellerai d'abord les *dépôts*, sur lesquels nous avons déjà insisté (n° 1128) avec des développements qui nous dispensent d'y revenir.

Je mentionnerai également les *corrosions*; sujet assez important pour que nous y revenions en détail dans le paragraphe 3 ci-après.

Une mauvaise conduite du foyer expose aux coups de feu (n° 1168). Une seule de ces avaries suffit quelquefois pour mettre la tôle hors de service. Une succession de surchauffes moins accentuées peut

arriver au même résultat. On ne doit pas hésiter, en pareil cas, à provoquer la réparation immédiate de la chaudière.

Les *fentes*, les *criques* doivent fixer l'attention dans les visites (n° 1169).

Il en est de même des *fuites* en marche. A ce sujet, il y a lieu de proscrire soigneusement une tendance qu'ont parfois les chauffeurs à *serrer à outrance les boulons* pour étancher les joints. Ils risquent par là (n° 1100) de rompre un écrou, et comme conséquence tous les autres successivement; l'effort se reportant de proche en proche, en s'aggravant chaque fois. L'ouvrier est alors la première victime de son imprudence.

1166 — *Défauts de fonctionnement.* — L'une des situations les plus dangereuses dans lesquelles puisse se trouver un générateur provient de la négligence du chauffeur à observer l'indicateur de niveau pour alimenter en temps utile. C'est l'*abaissement du plan d'eau* au-dessous de la ligne des carneaux. Nous consacrerons à son examen la totalité du paragraphe 4.

Une *élévation progressive de la pression* peut naître d'une négligence semblable de cet agent à observer le manomètre, et à dégager les soupapes de sûreté. Cet effet est souvent très rapide, surtout pendant un chômage momentané, tel que l'arrêt d'une locomotive; le moteur cessant pendant cet intervalle de soulager la chaudière par ses appels. La tension peut s'élever quelquefois d'un demi-kilogramme par minute. L'accroissement est d'ailleurs d'autant moins rapide que la provision d'eau est plus considérable.

Indépendamment de la négligence, on a trop souvent à reprocher à des chauffeurs des manœuvres aussi coupables qu'insensées. Ils paralysent volontairement le jeu des appareils de sûreté, afin de pouvoir gouverner la marche à leur guise. C'est ainsi que l'on voit des *soupapes calées* ou *surchargées*, des *flotteurs attachés*, des *graduations faussées*, etc.

1167 — *Causes fortuites.* — A côté des motifs classiques que nous venons d'énumérer, et qui se retrouvent constamment, à des degrés divers de fréquence, dans toutes les enquêtes adminis-

tratives, il se présente, quoique plus rarement, des *causes fortuites*, provenant d'un concours exceptionnel de circonstances contre lesquelles il était impossible de se tenir en garde.

On mentionne également des *causes inconnues* dans un très petit nombre de cas, pour lesquels l'instruction la plus attentive n'a pu réussir à mettre en évidence, avec quelque apparence de probabilité, une explication plausible de l'accident.

Il convient d'ajouter enfin les *causes mystérieuses*, que l'on a parfois mises en avant pour expliquer certains cas obscurs, mais qui restent contestées par la majorité des ingénieurs. C'est ainsi que l'on a invoqué l'intervention de l'*électricité*, de la *dissociation*, des *mélanges détonants*, de la *surchauffe de l'eau*. Cette dernière influence a été toutefois assez discutée pour que je croie devoir consacrer à son examen le paragraphe 5 ci-après.

§ 3

ALTÉRATIONS DE LA TOLE

1168 — *Coups de feu.* — L'affaiblissement de la tôle peut tenir à une *usure générale* qui augmente avec le temps, ou à des causes accidentelles : *coups de feu*, *fentes* ou *corrosions*. Examinons successivement ces dernières.

Les importantes expériences de M. Hirsch [1] ont montré qu'une tôle ordinaire, assurée d'un contact complet avec l'eau, peut supporter le feu le plus ardent sans que la température d'aucun point dépasse sensiblement celle du liquide. Mais si le moindre obstacle vient s'opposer à la conductibilité, il détermine alors le coup de feu. Nous avons déjà cité parmi ces obstacles : les pailles, les dédoublures, les chambres de vapeur, l'entartrement, les dépôts gras, l'oubli d'un chiffon dans les visites intérieures.

On doit cependant éviter soigneusement la production de dards de chalumeau frappant toujours au même point, surtout s'ils

[1] *Annales du Conservatoire*, 2ᵉ série, t. I, p. 51. — *Bulletin de la Société d'encouragement*, 4ᵉ série, t. V, p. 302.

sont formés de flammes particulièrement oxydantes (n° 1058).

La résistance d'une tôle qui a subi le coup de feu diminue quelquefois jusqu'au sixième de sa valeur. La surface prend un aspect caractéristique connu sous le nom de *fer brûlé*. On observe d'abord une teinte bleuâtre, due à une mince pellicule d'oxyde des battitures, qui se change bientôt en rouille. Le métal s'emboutit, et se gerce au sommet du mamelon.

1169 — *Fentes.* — Les fentes, criques, fissures, gerçures sont dues à l'aigreur de la tôle, native ou acquise.

La bande étroite qui borde les clouûres y est particulièrement exposée, surtout quand la rivure est mal exécutée. Mais des fissures qui s'étendent seulement d'un rivet au bord de la virole sont peu dangereuses. Celles qui vont d'un rivet à l'autre sont plus redoutables, et risquent de se propager au delà.

Les fentes en pleine tôle sont plus rares, mais beaucoup plus inquiétantes. Si on les voit augmenter, il faut immédiatement arrêter la marche et mettre l'appareil en réparation. Ces fissures sont difficilement visibles à froid. Sous pression, elles s'accusent par des fuites. Le cintrage en travers en est souvent l'origine; parfois aussi la congélation de l'eau en hiver [1].

1170 — *Corrosions.* — On distingue les corrosions extérieures ou intérieures [2]. Le métal résiste à cette influence d'une manière

[1] Cornut. Effet de la gelée sur les chaudières pleines. *Cinquième Congrès des Ingénieurs en chef des Associations de Propriétaires d'appareils à vapeur*, Lyon, 1881, p. 41.

[2] Fayol. Corrosion des chaudières. *Comptes rendus mensuels des séances de la Société de l'Industrie minérale de Saint-Étienne*, décembre 1876, p. 4. — Larbalétrier. Sur les corrosions des chaudières à vapeur. *Chronique industrielle*, avril 1890, p. 120. — Klein et Berg. Causes de corrosion des générateurs. *Comptes rendus des séances de l'Académie des sciences*, t. CII, p. 1170. — Meurgey. Corrosions extérieures. *Comptes rendus mensuels des séances de la Société de l'Industrie minérale de Saint-Étienne*, novembre 1876, p. 12. — Durand. Corrosions intérieures. *Ibidem*, février 1877, p. 12. — Ledieu. Causes d'altération intérieure des chaudières. *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, 26 juillet 1880. — Lodin. Sur les causes d'altération intérieure des chaudières à vapeur. *Ibidem*, 26 juillet 1880, p. 217. — Olivier. *Note sur les défauts, corrosions et incrustations des chaudières à vapeur*, 1883. — Gruner. Corrosion du fer et de l'acier. *Annales des mines*, 1883. — Richard. *La chaudière locomotive*, p. 349. — Stoclet. Emploi des eaux des houillères dans les générateurs à vapeur. *Revue industrielle des*

variable avec sa nature (fig. 716). Certains fers puddlés sont détruits en 10 ou 12 ans; d'autres résistent 25 et 30 ans. Quelques praticiens ont énoncé la crainte que l'acier s'use plus vite que le fer, surtout s'il renferme du phosphore. Une certaine durée sera nécessaire pour permettre d'asseoir une opinion définitive sur cette matière. Ces altérations affectent divers types caractéristiques.

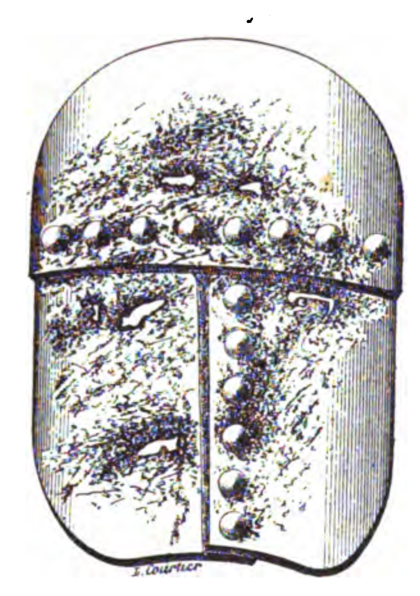


Fig. 716. — Corrosion générale.

Les *corrosions en surface* peuvent altérer des plages plus ou moins étendues, et arriver à réduire l'épaisseur à un degré de ténuité difficile à imaginer. On a vu des tôles de 7 à 8 millimètres se réduire à 1 millimètre, et même encore un peu moins, de manière à se trouver à

mines, t. XIX, p. 432. — *Revue technique de l'Exposition de* 1889, 6e partie, t. I, p. 421. — Bour. *Société industrielle de Lyon*, 9 novembre 1881. — *Comptes rendus des Associations de Propriétaires d'appareils à vapeur*; collection précieuse en ce qui concerne les explosions. — Lavezzari. Note sur la recherche des défauts des générateurs de vapeur, et remèdes à y apporter. *Annales du travail*, 1891. — Scheurer-Kestner et Meunier. *Bulletin de la Société industrielle de Mulhouse*, mai 1871. — Miln. *Revue maritime et coloniale*, mars 1876, p. 910. — Couche. *Voie, matériel roulant, exploitation technique des chemins de fer*, t. III, p. 112. — Hanet-Cléry. *Annales des Mines*, 7e série, t. IX, p. 455. — De Grossouvre. *Ibidem*, t. XI, p. 366. — Bour. *Comptes rendus mensuels des séances de la Société de l'Industrie minérale de Saint-Étienne*, 1887, p. 234. — *Revue industrielle*, 1877, p. 306. — *Quatrième Congrès des Ingénieurs en chef des Associations de Propriétaires d'appareils à vapeur*, p. 72, 81. — *Treizième Congrès*, p. 169, 175, 184.

Hallet. On the causes and remedies of corrosions in marine boilers. *Institution of mechanical Engineers*, août 1884, p. 331. — Miln. On the corrosion of boilers. *Proceedings of the Institution of civil Engineers*, 9 octobre 1875. — Isherwood. On the corrosion of plate iron feed water heaters for steam boilers. *Journal of Franklin Institute*, août 1879, p. 80. — Navy. *On the causes of deterioration of boilers*, 1877. — Swinburnking. Internal corrosion and scale in steam boilers. *Van Nostrand's Engineering magazine*, juin 1884, p. 509. — Phillips (On the comparative endurances of iron and mild steel when exposed to corrosive influences. *Institution of civil Engineers*, t. LXV, 3e partie, p. 30. — On the effect of liquids on iron. *Ibidem*, 1885, p. 86). — Rowan. On boiler incrustation and corrosion. *British Association*, septembre 1876. —

la merci du moindre incident. Parfois la partie amincie reste mamelonnée; mais ce caractère manque souvent. Une surface lisse sera dans ce cas particulièrement dangereuse; car rien ne vient la signaler directement à l'attention que le son du marteau, indication bien précaire. Ce genre d'altération se rencontre le plus ordinairement dans la partie inférieure de la chaudière, ou aux environs du plan d'eau.

Les *corrosions en pustules* sont fréquentes et assez difficiles à expliquer (fig. 717). La surface est alors *grêlée* de cavités petites et profondes, assez irrégulièrement réparties, mais cependant le plus souvent concentrées dans le bas du générateur. L'acier y semble plus prédisposé que le fer. Ces perforations peuvent échapper à l'attention. Après un nettoyage, la plombagine dont on enduit la chaudière bouche les trous. Ils peuvent aussi être remplis d'oxyde, ou recouverts de tartre. Ce type d'altération est d'ailleurs moins à craindre que le précédent.

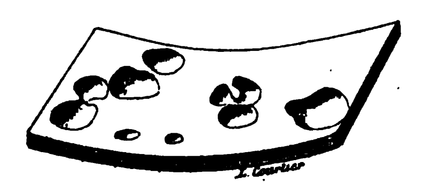


Fig. 717. — Corrosion par pustules.

Les corrosions par *vermiculures* procèdent probablement d'une cause analogue et aussi obscure. Elles peuvent devenir dangereuses, lorsqu'elles sont profondes.

Les *corrosions par sillons*, quand elles sont dues à des effets statiques, suivent les lignes de la chaudière qui se trouvent soumises aux plus grands efforts, telles que les congés d'emboutissage et les clouûres. Dans certains cas exceptionnels, des courants gazeux peuvent également entamer les métaux, notamment le cuivre ([1]).

A. Paget. On the wear and tear and steam boilers. *Journal of Arts*, avril 1865, p. 40. — Dana et Hayes. *Journal of the chemical Society*, t. XIII, p. 294. — Croce Calvert. *Philosophical Society of Manchester*, 3e série, t. V. — Adamson et Rogerson. *Journal of iron and steel Institute*, novembre 1878. — *Steam manual*, 26 mai 1879. — Murray. *Journal of the royal united Service*, t. XXIV, p. 260. — *Engineering*, 28 juin 1878.

Wochenschrift des œsterreichische Ingenieuren und Architekten Vereines. — Flimmers. *Sur les avaries et les accidents de chaudière, et la manière de les prévenir*, 1884, Leipzig.

([1]) Bour. Corrosion d'une communication par le frottement d'un courant de vapeur. *Neuvième Congrès des Ingénieurs en chef des Associations de Propriétaires d'appareils à vapeur*, Paris, 1886, p. 126.

1171 — Parmi les causes capables de produire ces divers résultats, il faut citer d'abord les agents atmosphériques. L'oxydation due à l'air est favorisée par l'humidité, qui se trouve maintenue par la capillarité sur divers points en dehors du bain liquide, tels que le bâillement des rivures ou le contact des maçonneries. Elle est activée par les courants thermo-électriques, auxquels peuvent donner lieu certains défauts d'homogénéité. Les chômages sont surtout nuisibles. On ne doit jamais laisser des flaques d'eau dans une chaudière refroidie.

Les acides agissent encore plus activement, surtout à la ligne d'eau, attendu que le liquide qui mouille la tôle, quand le niveau s'abaisse, voit son acidité se concentrer par l'évaporation. A l'intérieur on est exposé à la production d'acides gras, en raison de la saponification des lubrifiants qui ont été apportés dans la chaudière par les eaux du condenseur. Les sulfates de fer ou d'alumine sont oxydants. Les chlorures attaquent vivement le fer [1], surtout le sel marin en présence du carbonate de soude, et encore plus le chlorure de magnésium.

A l'extérieur, les fumées peuvent être chargées d'acides organiques, ou d'acide sulfurique provenant des pyrites. On doit reconnaître que le principe de la circulation méthodique est défavorable à cet égard, attendu qu'il favorise la condensation de ces vapeurs dans les suies dont il détermine le dépôt sur les parties les moins chaudes de l'appareil.

1172 — Les remèdes que l'on peut opposer à ces causes de destruction sont avant tout des visites régulières et attentives. On gratte l'oxyde de fer, et l'on enduit la place de goudron ou de pétrole. Le zinc agit comme anti-corrosif, en même temps que comme anti-incrustant. Plus oxydable que le fer, il concentre sur lui-même l'action des acides dissous.

M. Feldbacher a proposé, pour empêcher la corrosion de la tôle, un doublage en cuivre ou en laiton de 1 millimètre et demi d'épais-

[1] Bour. Corrosion produite par le chlorure de baryum. *Cinquième Congrès des Ingénieurs en chef des Associations de Propriétaires d'appareils à vapeur*, Lyon, 1881, p. 53.

seur. M. Mac Dounal, M. Œhme la recouvrent de zinc et ensuite de plomb. Ce dernier métal n'adhérerait pas de lui-même au fer. On peut craindre que, dans les nettoyages, de tels revêtements viennent à être endommagés par le choc des outils.

Pendant les chômages, on fera bien de remplir la chaudière d'eau chargée de carbonate de soude. On en éprouve la teneur en y plaçant des morceaux de fer bien décapés. S'ils sont rouillés au bout de quelques jours, il faut ajouter encore du carbonate. On peut aussi mettre dans le générateur de la chaux vive pour absorber l'humidité, et y brûler du charbon de bois afin de remplacer l'air par de l'acide carbonique; après quoi l'on ferme toutes les ouvertures. L'intérieur se trouve ainsi garanti contre les influences oxydantes. On a conseillé également l'emploi d'une couche de peinture au minium (1).

§ 4

ABAISSEMENT DU NIVEAU

1173 — *Causes de l'abaissement.* — Diverses causes peuvent concourir à l'abaissement de la surface liquide. C'est d'abord la négligence du chauffeur à observer l'indicateur de niveau, pour alimenter en temps utile.

Mais en outre son action peut être déçue par des circonstances ignorées de lui, au moins dès l'abord, telles que : le mauvais fonctionnement des pompes, l'obstruction de la conduite d'alimentation, une fuite de la chaudière, un défaut du tube de communication de l'indicateur avec l'intérieur, soit comme longueur soit comme diamètre, un dérangement des repères, une avarie du flotteur d'alarme.

1174 — L'importance relative de la disparition d'un volume donné ne sera d'ailleurs pas la même pour toutes les chaudières. L'abaissement qui en résultera se limitera évidemment

(1) *Quatrième Congrès des Ingénieurs en chef des Associations de Propriétaires d'appareils à vapeur*, Rouen, 1881, p. 84.

d'autant plus que l'étendue de la surface liquide sera plus notable.

De là une supériorité des chaudières horizontales sur les générateurs verticaux. Les appareils les plus exposés sous ce rapport seront les inexplosibles, en raison du faible volume qu'ils renferment, dont la perte subie représentera une fraction plus sensible. C'est surtout pour eux que sont utiles les régulateurs d'alimentation.

1175 — *Durée de l'abaissement.* — En supposant que la consommation de vapeur par le moteur se continue de manière que la pression conserve sa valeur, il peut être utile de déterminer la plus ou moins grande rapidité de cet abaissement, soit pour une étude *a priori*, soit en vue d'apporter, le cas échéant, avec toute la prudence nécessaire en aussi grave matière, un élément d'appréciation à l'instruction qui suit un accident (¹).

On doit pour cela distinguer deux cas, suivant que l'amplitude d'abaissement se trouve comprise au-dessus ou au-dessous de la ligne des carneaux. Si elle passe d'un côté à l'autre, on envisagera séparément chacune de ses deux parties.

La première question ne donne lieu à aucune difficulté. Il suffit de cuber, par les moyens que fournit le Calcul intégral, le volume disparu, et de le diviser par le produit de la surface *invariable* de chauffe et du coefficient spécifique d'évaporation rapporté au mètre carré.

Le second cas nécessite au contraire une recherche spéciale, la surface de contact du métal avec le liquide variant incessamment pendant l'abaissement du plan d'eau. Nous supposerons que l'on parte pour cela de la ligne des carneaux ; d'un côté parce que c'est en effet ainsi que les choses se passent dans la réalité, et que d'ailleurs la considération d'un intervalle quelconque résulterait de la différence de deux semblables évaluations.

Rapportons l'équation de la surface du générateur à trois axes

(¹) Guchez. *Note sur un problème relatif à l'évaporation de l'eau dans les chaudières cylindriques simples*, 1881. — Haton de la Goupillière. Sur la durée de l'évaporation dans les générateurs non alimentés. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, 4 et 11 mai 1891.

rectangulaires x, y, z. A une altitude fixe z_0, se trouve le plan horizontal de la ligne des carneaux, au-dessous duquel s'étend la surface totale de chauffe S_0. Quand le niveau s'abaisse à une hauteur z, cette superficie se réduit à S, et au-dessus d'elle règne une zone surchauffée $S_0 - S$. Le générateur se termine à sa partie inférieure par un ou plusieurs points minima situés à une hauteur z_1, parfois par une ligne horizontable [1], autrefois même par un fond plat.

Nous appellerons v le volume d'eau en mètres cubes que vaporise par seconde le mètre carré de surface métallique.

Cette *conductibilité directe* constitue le facteur prépondérant du phénomène, mais non le seul. Une certaine *conductibilité indirecte* s'effectue entre le métal rougi et la zone adjacente de tôle mouillée [2]. Nous admettrons de ce chef un supplément d'efficacité w par mètre courant du périmètre σ du plan d'eau.

Enfin la surface échauffée exerce par son rayonnement sur le liquide une action spéciale u, que nous rapportons en bloc, comme la première, au mètre carré de la superficie $S_0 - S$. On peut considérer ce troisième élément comme résumant en même temps dans son influence l'accroissement d'activité que devrait convenablement subir le coefficient v, lorsque, par l'abaissement du niveau, son application se concentre sur des portions attaquées de plus en plus directement par les flammes.

Les expressions S, s, σ se déduiront de l'équation proposée à l'aide des méthodes que fournit le Calcul intégral. Quant aux coefficients u, w, ils ne paraissent pas avoir été encore pris en considération, et il serait sans doute prématuré de leur attribuer ici des valeurs numériques déterminées. La plupart du temps on se contentera sans doute de les annuler. Cependant il serait désirable de voir l'attention des praticiens se porter sur cette lacune.

Il nous est maintenant facile de former l'équation différentielle du phénomène. La valeur absolue $-sdz$ de la tranche qui dispa-

[1] Sauf une légère inclinaison en vue de la vidange, que nous négligerons dans cette recherche.

[2] D'après les expériences récentes de M. Witz, cette *conduction latérale* a un effet beaucoup plus considérable qu'on ne le pensait jusqu'ici (A. Witz. *Revue générale des sciences pures et appliquées*, 15 avril 1892, p. 242).

rait dans un temps dt représente le total des trois influences précédentes :

$$- s\,dz = [vS + w\sigma + u\,(S_0 - S)]\,dt,$$

$$dt = - \frac{s\,dz}{(v-u)S + w\sigma + uS_0},$$

$$t = \int_z^{z_0} \frac{s\,dz}{(v-u)S + w\sigma + uS_0},$$

expression dans laquelle u, v, w représentent, ainsi que S_0, des constantes numériques; S, s, σ des fonctions déterminées de z.

1176 — Envisageons, comme première application, une chaudière verticale, constituée à l'aide d'un cylindre de forme quelconque, qui est foncé à sa partie inférieure par une surface arbitraire. Les chaudières verticales métallurgiques, ainsi que les types Field, Thirion, Chevalier, etc., rentrent dans cette donnée. Le périmètre σ et l'aire s de la section droite restent alors constants, si nous supposons que l'abaissement se maintienne dans le corps cylindrique sans atteindre la fonçure. On a, en outre :

$$S_0 - S = \sigma(z_0 - z),$$

$$S = (S_0 - \sigma z_0) + \sigma z.$$

Il vient, dans ces conditions :

$$t = \frac{s}{vS_0 + w\sigma} \int_z^{z_0} \frac{dz}{1 + \frac{(v-u)\sigma}{vS_0 + w\sigma}(z - z_0)}.$$

et en intégrant avec un logarithme *népérien* :

$$t = \frac{s}{(u-v)\sigma} L\left[1 + \frac{(v-u)\sigma}{vS_0 + w\sigma}(z - z_0)\right].$$

Supposons en particulier un cylindre circulaire de hauteur h, de

rayon r, de périmètre $\sigma = 2\pi r$, de section $s = \pi r^2$, foncé à l'aide d'un hémisphère, de telle sorte que $S_0 = 2\pi r^2 + 2\pi rh$. On trouve, dans ce cas, pour un abaissement : $z_0 - z = \eta$:

$$t = \frac{r}{2(u-v)} L\left[1 + \frac{(u-v)\eta}{v(r+h)+w}\right].$$

Supposons, pour fixer les idées, la valeur $v = 36$ (n° 935), en négligeant d'autre part l'influence de u et de w. Nous aurons ainsi :

$$t = -\frac{r}{2} \cdot 10^5 . L\left(1 - \frac{\eta}{r+h}\right).$$

Admettons, par exemple, que l'évaporation s'effectue sur toute la hauteur h, supposée égale au diamètre. Il vient alors :

$$T = \frac{r}{2} \cdot 10^5 . L\,3 = \frac{r}{2} \cdot 10^5 . 2,3026 . \log 3 = 54030\, r,$$

et pour un diamètre égal á 1^m (¹) :

$$T = 27\,465^s = 7^h 37^m 45^s.$$

1177 — Considérons en second lieu une chaudière horizontale à corps cylindrique, assez longue pour nous permettre de faire abstraction de l'influence des fonds. La durée étant alors indépendante de la longueur, nous pouvons supposer celle-ci égale à l'unité, ce qui donne :

$$\sigma = 2, \qquad s = 2\sqrt{z(2r-z)}, \qquad S = \pi r + 2r \arcsin\frac{z-r}{r};$$

$$(v-u)rt = \int_z^{z_0} \frac{\sqrt{z(2r-z)}\,dz}{\arcsin\frac{z-r}{r} + \frac{1}{v-u}\left(\frac{v\pi}{2} + \frac{w}{r} + u \arcsin\frac{z_0 - r}{r}\right)}.$$

(¹) Si l'on effectuait directement le calcul, en supposant constante la surface de chauffe, on obtiendrait un résultat trop faible dans le rapport 0,9102. Pour le diamètre de 1^m, l'erreur absolue *en moins* serait : $41^m 5^s$. Si, pour essayer de tenir grossièrement compte de la variation de S par un procédé élémentaire, on adoptait pour son éva-

Posons, pour abréger :

$$a = \frac{2}{v-u}\left(\frac{v\pi}{2} + \frac{w}{r} + u \arcsin\frac{z_0 - r}{r}\right),$$

$$\alpha = 2 \arcsin \frac{z-r}{r} + a,$$

d'où il suit :

$$\frac{z-r}{r} = \sin\frac{\alpha - a}{2}, \qquad dz = \frac{r}{2}\cos\frac{\alpha-a}{2}\,d\alpha,$$

$$\sqrt{z(2r-z)} = r\cos\frac{\alpha-a}{2};$$

$$2\frac{v-u}{r}t = \int_\alpha^{\alpha_0} 2\cos^2\left(\frac{\alpha-a}{2}\right)\frac{d\alpha}{\alpha} = \int_\alpha^{\alpha_0}\frac{1+\cos(\alpha-a)}{\alpha}d\alpha$$

$$= \int_\alpha^{\alpha_0}\frac{(1+\cos a) - \cos a(1-\cos\alpha) + \sin a \sin\alpha}{\alpha}d\alpha.$$

Les intégrales de ce type ne sont pas connues en termes finis; mais nous aurons, en employant le développement en séries :

$$2\frac{v-u}{r}t = 2\cos^2\frac{a}{2}L\frac{\alpha_0}{\alpha} + \sin a\left(\alpha - \frac{1}{3}\frac{\alpha^3}{1.2.3} + \frac{1}{5}\frac{\alpha^5}{1.2.3.4.5} - \dots\right)_\alpha^{\alpha_0}$$

$$- \cos a\left(\frac{1}{2}\frac{\alpha^2}{1.2} - \frac{1}{4}\frac{\alpha^4}{1.2.3.4} + \frac{1}{6}\frac{\alpha^6}{1.2.3.4.5.6} - \dots\right)_\alpha^{\alpha_0},$$

avec des suites encore plus convergentes que celles du sinus et du cosinus.

Il vient, en particulier, pour l'hypothèse simplifiée, $u = 0$, $w = 0$:

$$a = \pi, \qquad \sin a = 0, \qquad \cos a = -1, \qquad \cos\frac{a}{2} = 0,$$

luation *fixe* la moyenne arithmétique entre ses valeurs initiale et finale, on trouverait un chiffre 1,2137 fois trop fort; et l'erreur *en plus* serait, pour l'exemple précédent : $1^h 37^m 49^s$.

d'où :

$$\frac{2(v-u)}{r}t = \left(\frac{1}{2}\frac{\alpha^2}{1.2} - \frac{1}{4}\frac{\alpha^4}{1.2.3.4} + \frac{1}{6}\frac{\alpha^6}{1.2.3.4.5.6} - \dots\right)_{\alpha}^{\alpha_0}.$$

Cette série donne, par ses six premiers termes :

$$\frac{\alpha^2}{4} - \frac{\alpha^4}{96} + \frac{\alpha^6}{4\,320} - \frac{\alpha^8}{322\,560} + \frac{\alpha^{10}}{36\,288\,000} - \frac{\alpha^{12}}{5\,748\,019\,200},$$

ou encore :

$$\begin{aligned} &0{,}250\,000\,000\,000\,\alpha^2 - 0{,}010\,416\,666\,667\,\alpha^4 \\ +\ &0{,}000\,231\,481\,483\,\alpha^6 - 0{,}000\,003\,100\,198\,\alpha^8 \\ +\ &0{,}000\,000\,027\,557\,\alpha^{10} - 0{,}000\,000\,000\,173\,\alpha^{12}. \end{aligned}$$

La variable α est croissante depuis zéro, pour le point le plus bas, jusqu'à 2π au sommet. Mais le plan des carneaux ne dépassera guère en pratique le milieu du rayon vertical, pour lequel $\alpha = \frac{4\pi}{3}$.

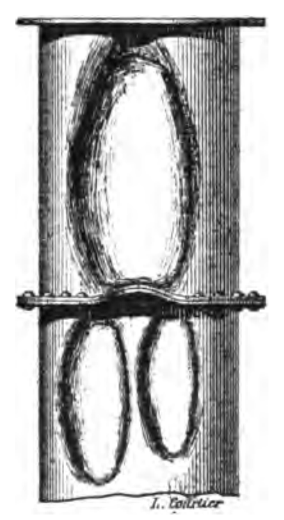
Le quotient du septième terme $0{,}000\,000\,000\,000\,743\,\alpha^{14}$ par l'ensemble des deux premiers, constitue une limite supérieure de l'erreur relative que l'on commet en s'arrêtant au sixième. Elle prend, dans ce dernier cas, le plus défavorable de tous, la valeur 0,000 380 dont l'extrême petitesse, pour une question de cette nature, montre que l'on pourra ordinairement se borner à un nombre de termes très restreint (¹).

Si l'on place, en particulier, le plan des carneaux dans le méridien horizontal, en faisant $\alpha_0 = \pi$, il faudra pour la vidange complète $0{,}825\,\frac{R}{v}$; et avec le rayon de 1^m, une durée de $82500^s = 22^h55^m$ (²).

(¹) C'est surtout pour les valeurs de α inférieures à l'unité que la convergence serait la plus accusée; mais elles ne seront jamais pratiques, car elles ne s'étendent pas au delà de 29°38'52" du point le plus bas.

(²) En calculant au moyen de la surface initiale, on trouverait un chiffre 0,606 fois trop faible, et un écart *en moins* de $9^h1^m40^s$ pour le cas précédent. Avec la moyenne arithmétique, on obtient un résultat 1,212 fois trop fort, et pour le rayon de 1^m, une erreur *en trop* de $4^h51^m40^s$.

1178 — *Effets de l'abaissement.* — Tout le monde s'accorde à regarder comme dangereuse la situation d'une chaudière dont le chauffeur a laissé abaisser le niveau au-dessous de la ligne des carneaux ([1]). Les opinions ne diffèrent à cet égard que sur le degré du péril. On a été longtemps unanime à le regarder comme des plus graves. Depuis quelque temps cependant une atténuation sensible s'est produite, ainsi que je l'indiquerai plus loin (n° 1180), dans la manière de voir d'un certain nombre d'ingénieurs, qui ne forment toutefois pas la majorité.


Fig. 718. — Emboutissage par manque d'alimentation.

Le fait incontestable est que la tôle non mouillée est exposée à rougir rapidement. Sa résistance diminuant aux températures élevées, la rupture risque de se produire, malgré des dispositions qui pourraient être, à juste titre, considérées comme suffisantes dans les conditions normales. Si la catastrophe est écartée, on évitera difficilement le coup de feu, avec obligation de mettre la chaudière en réparation (fig. 718, 719).

La situation s'aggravera encore si l'on vient à mettre en marche une machine arrêtée, ou si le chauffeur soulage une soupape de sûreté. Le soulèvement de l'eau provoqué par la diminution de pression produira une secousse capable d'amener l'explosion ([2]).

Ce sera encore pis, si l'on alimente dans de telles conditions. La rétraction subitement déterminée dans une zone contiguë à une partie encore rouge, peut suffire à causer une déchirure. En outre, la quantité considérable de calories cédées par le métal surchauffé occasionne une formation instantanée de vapeur, en-

([1]) A la vérité, on use de tolérance pour certaines parties qui se trouvent au contact de gaz déjà refroidis. Mais, au-dessus de 350 degrés, il est impossible d'admettre qu'aucune paroi métallique ne soit pas mouillée sur sa face opposée à l'action calorifique (Hirsch et Debize. *Leçons sur les machines à vapeur*, t. I, p. 556).

([2]) A ces motifs se joint, pour les chaudières marines, l'influence des mouvements du navire

traînant un accroissement de pression ([1]), qui vient précisément coïncider avec la diminution actuelle de résistance.

1179 — On peut se rendre compte numériquement, bien que d'une manière approximative, de l'importance de ce dernier effet.

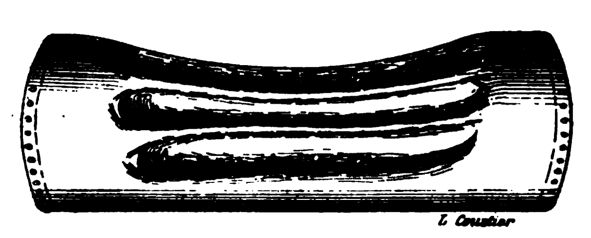


Fig. 719. — Écrasement d'un foyer intérieur.

Envisageons comme exemple un corps cylindrique horizontal mesurant 10 mètres suivant ses génératrices sur 1 mètre de diamètre, terminé par deux hémisphères, et à moitié plein d'eau. Le volume de vapeur sera dans ces conditions :

$$\frac{1}{2}\left(\frac{\pi d^2}{4}l + \frac{\pi d^3}{6}\right) = \frac{4}{3}\pi = 4^{m3},1888.$$

Admettons une pression absolue de 5 kilogrammes par centimètre carré. La température correspondante est de 150°,99 ([2]) et le poids spécifique 2,667. Le poids de la vapeur contenue aura donc pour valeur :

$$2,667 \times 4,1888 = 11^{kg},17.$$

Supposons maintenant un abaissement de niveau de 10 centimè-

([1]) C'est à ce moment, et non pendant l'abaissement du niveau, que l'on constatera en général une augmentation de tension d'après l'observation du manomètre. Ce n'est pas cet appareil, mais l'indicateur de niveau, qui peut avertir à coup sûr de l'état anormal des choses. On pourra ne pas voir monter le premier, et le voir même descendre, si la surface mouillée par l'eau arrive à se réduire sensiblement; car c'est elle qui est le principal agent de transmission du calorique des gaz à l'eau enfermée dans la chaudière.

([2]) Voy. t. I, p. 778.

tres (¹). Le pourtour de la surface liquide aura pour expression :

$$2l + \pi d = 20 + \pi = 23^{m},14.$$

La surface surchauffée sera donc :

$$0,1 \times 23,14 = 2^{m^2},314.$$

Admettons pour l'enveloppe une épaisseur d'un centimètre. Cette bande de tôle aura pour volume :

$$0,01 \times 2,314 = 0^{m^3},02314 ;$$

et comme le poids spécifique du fer est 7 790, le poids du métal mis à découvert sera :

$$0,02314 \times 7790 = 180^{kg},261.$$

Bornons-nous à supposer qu'il atteigne la température du rouge sombre, qui représente environ 700 degrés (²). Il devra, par l'alimentation, retomber à celle de 151, en perdant par conséquent 549 degrés centigrades. La chaleur spécifique du fer est 0,11379. Chaque kilogramme laissera donc disponible le nombre de calories :

$$549 \times 0,11379 = 62^{cal},47.$$

Le poids considéré fournira dès lors :

$$180,261 \times 62,47 = 11\,261^{cal}.$$

D'un autre côté, pour constituer un kilogramme de vapeur à la température de 151 degrés, il faut un nombre de calories r_{151} ou

(¹) En confondant un arc aussi limité avec son sinus, et la zone découverte avec un cylindre vertical.

(²) Annuaire du Bureau des longitudes, 1891, p. 557.

500,08 [1]. Il pourra donc, dans la circonstance actuelle, se former le poids de vapeur :

$$\frac{11\,261}{500,08} = 22^{kg},52.$$

Cette quantité viendra s'ajouter aux 11 kg. 17 qui préexistaient dans la chaudière, pour fournir le poids total 33 kg. 69 en triplant ainsi celui de l'atmosphère qui surmonte le liquide. Le volume, redevenant d'ailleurs le même en raison de l'alimentation, est de $4^{m^3},1888$; ce qui donne pour poids spécifique du nouveau fluide :

$$\frac{33,69}{4,1888} = 8,04.$$

La pression qui lui correspond est égale, en nombre rond, à 16 kilogrammes par centimètre carré.

A la vérité ce surcroît de vapeur se forme progressivement, et par conséquent sous une pression variable bien supérieure en moyenne à celle de 5 kilogrammes, en vue de laquelle nous avons fait le calcul, en adoptant pour r la valeur ci-dessus. Le chiffre obtenu n'est donc qu'approximatif; mais le véritable résultat ne peut que lui être supérieur, car r est une fonction décroissante. Le poids spécifique théorique est donc encore plus fort que nous ne l'avons trouvé, ainsi que la pression.

On voit par suite à quel point les prévisions peuvent être dépassées dans ces conditions critiques, sous le rapport des efforts en vue desquels la chaudière a été construite, et a subi l'épreuve réglementaire (n° 1189).

1180 — Il est toutefois nécessaire d'ajouter que des calculs assis sur des bases aussi hypothétiques exigeraient, pour être acceptés comme définitifs, un certain contrôle expérimental. On croyait le trouver suffisamment dans le grand nombre d'accidents qui accompagnent manifestement les défauts d'alimentation, sans pouvoir à la

[1] Voy. t. I, p. 778.

vérité y faire avec clarté la part respective de chacune des influences énumérées ci-dessus. Or nous devons dire que des expériences directes viennent d'être exécutées sur ce sujet par M. Fletcher [1], pour l'Association des propriétaires d'appareils à vapeur de Manchester, et qu'elles ont semblé établir un résultat précisément inverse.

En alimentant sur des tôles déjà rouges, on ne constatait pas, conformément aux idées reçues, une élévation rapide de la pression. Au contraire celle-ci, après avoir monté légèrement, mais non d'une manière inquiétante, arrivait à diminuer progressivement, au fur et à mesure qu'augmentait l'injection d'eau. Il y a donc là une indication d'une grande importance, qui appelle sans doute une revision et des discussions attentives, mais qui explique assurément la réserve que certains esprits ont cru devoir apporter dès à présent aux anciennes assertions relatives à l'augmentation de pression due à l'alimentation à niveau bas. On ne devra cependant pas perdre de vue à cet égard les expériences encore plus récentes de M. Witz, dont il sera question plus loin (n° 1183), et qui sont de nature à introduire dans cette discussion un sérieux élément de préoccupation en sens contraire.

1181 — Dans tous les cas, comme on ne saurait nier, en dehors de l'altération de pression dû à une alimentation intempestive, les autres inconvénients d'une telle situation, il y a lieu d'éviter avec le plus grand soin tout ce qui peut y conduire.

Si néanmoins un pareil état de choses a pris naissance, on ne doit y chercher remède, d'après ce qui précède, ni dans l'alimentation [2], ni dans l'ouverture des soupapes. Il faut, à l'instant même où l'on s'en aperçoit, jeter bas le feu, et ouvrir en grand les portes du foyer, pour que le courant d'air frais entretenu par l'accumu-

[1] Fletcher (*Engineering*, 1891, 1er sem., p. 202, 290, 321. — *Annales industrielles*, 31 mai 1891, p. 674). — *Moniteur industriel*, 26 janvier 1892. — Sauvage. *Annales des mines*, 8e série, t. XIX, p. 348. — Alimentation d'une chaudière dont les surfaces de chauffe sont découvertes. *Mémoires de la Société des Ingénieurs civils*, octobre 1891, p. 452.

[2] Il est assurément conforme à la prudence de s'en tenir à ces règles classiques, et de ne pas s'en départir, jusqu'à ce que le jour soit fait définitivement sur les vues nouvelles auxquelles nous venons de faire allusion.

lation de chaleur arrive à faire tomber le plus rapidement possible la température.

1182 — *Eau surchauffée.* — Il s'agit ici d'un point douteux et très discuté, qui semble cependant aujourd'hui tranché définitivement dans un sens négatif (1).

On a depuis longtemps été frappé du nombre considérable d'explosions survenues immédiatement, ou peu après la remise en marche qui suit un arrêt momentané, tel que l'instant du repas des ouvriers d'une usine à vapeur. Les chauffeurs expérimentés ne mettent alors en marche qu'avec quelque lenteur.

Certains esprits (2) ont rapproché l'action calorifique que subit dans un tel intervalle l'eau en repos (3), des phénomènes de *surchauffe* qui ont été étudiés par De Luc, Gay-Lussac, Magnus, Donny, Dufour de Lausanne, Krebs, et particulièrement M. Gernez, ainsi que des remarquables expériences de Boutigny, Leidenfrost, Pouillet, Melsens, relatives à ce que l'on a nommé l'*état sphéroïdal* (4).

Il est en effet incontestable que, pour des essais de précision exécutés dans le calme du laboratoire et sur de petites quantités d'eau, l'on arrive à porter ce liquide jusqu'à la température de 137 degrés à l'air libre (5). Cet état d'équilibre éminemment instable prend alors fin par une sorte de déflagration relativement violente.

1183 — La persistance d'un certain courant d'opinion à rap-

(1) Fayol. De la surchauffe dans les machines à vapeur. *Bulletin de la Société de l'industrie minérale de Saint-Étienne*, 2e série, t. XIII, p. 621. — Melsens. État sphéroïdal dans les chaudières à vapeur. *Bulletin de la Société d'encouragement*, 3e série, t. X, p. 507. — Richard. *La chaudière locomotive*, p. 310.

(2) Mangin. *Mémorial du Génie maritime*, 1862, 4e livraison. — Coumandant Trèves. *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, 18 septembre 1882, 9 et 22 avril 1883. — Obé. *Revue industrielle*, 14 décembre 1881. — Thurston (*Journal of Franklin Institute*, décembre 1884, janvier 1885. — *The Engineer*, 26 juin 1885).

(3) *Bouillantage* à petit feu.

(4) *Catéchisme du chauffeur de chaudières sphéroïdales*, in-8°, Saint-Étienne, 1858. — Chameroy (*Chaudière à vaporisation instantanée*, autographié. — *Machine à explosion de vapeur*, autographié).

Les appareils fondés sur ces principes auraient avant tout à être mis en règle avec les prescriptions administratives, avant tout fonctionnement industriel.

(5) M. Dufour a été jusqu'à 200 degrés (Richard. *La chaudière locomotive*, p. 310).

porter à cet ordre de faits des *explosions fulminantes* d'une grande intensité, qu'il paraissait difficile d'expliquer autrement, ont décidé la Commission centrale des machines à vapeur à déléguer à une sous-commission prise dans son sein, le soin d'effectuer sur ce sujet des expériences présentant un caractère industriel aussi rapproché que possible des conditions de la pratique. M. Hirsch a rédigé en son nom, à la date du 5 février 1884, un savant rapport [1] qui conclut dans les termes suivants :

« Il n'est nullement démontré, quant à présent, que la surchauffe de l'eau ait causé aucune explosion de chaudière, ni qu'elle se soit jamais produite dans les générateurs de l'industrie. Si elle se produit, ce n'est que dans des cas extrêmement rares, et par un concours de circonstances qui ne sont ni définies ni connues. Il n'y a donc pas lieu, pour le moment, d'examiner les remèdes qui ont été proposés pour combattre la surchauffe de l'eau dans les chaudières [2]. »

M. Aimé Witz a repris encore plus récemment [3] des expériences du même genre, et il arrive à cette conclusion que l'effet Boutigny ne se produit pas dans les chaudières sur les tôles rougies. La production de l'état globulaire y est impossible en pleine masse d'eau, à cause des courants qui prennent naissance. Mais des phénomènes de tension superficielle interviennent sans doute, car la vaporisation y devient d'une activité extraordinaire, qui mérite d'attirer l'attention des savants et des ingénieurs. Cet expérimentateur, dont on connaît la grande compétence, a constaté en effet qu'une tôle rougie à sec reste rouge sous l'eau, si le feu est poussé avec assez d'intensité. Son pouvoir de vaporisation peut alors atteindre le chiffre colossal, qui eût été inimaginable avant ces essais, de 994 kilogrammes d'eau par mètre carré et par heure; c'est-à-dire

[1] *Annales des mines*, 8e série, t. V, p. 171. — *Portefeuille économique des machines*, janvier, février 1885.

[2] Déjà en septembre 1881, le Congrès des Ingénieurs en chef des Associations de Propriétaires d'appareils à vapeur avait émis l'avis suivant : « Il ne paraît pas démontré jusqu'à présent qu'il puisse se trouver, dans les chaudières en fonctionnement industriel, de l'eau à une température supérieure à celle qui correspond à la pression. »

[3] Aimé Witz. Recherches sur la réalisation de l'état sphéroïdal dans les chaudières à vapeur. *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, 22 février 1892, p. 411.

presque le décuple de ce que les anciennes expériences autorisaient à admettre pour les conditions ordinaires ([1]).

§ 5

STATISTIQUE

1184 — L'Administration publie chaque année, dans les *Annales des mines* et dans la *Statistique de l'industrie minérale et des appareils à vapeur en France et en Algérie,* le relevé détaillé des accidents qui ont été occasionnés par ces derniers.

Le tableau suivant résume pour une durée de vingt années, qui s'étend de 1866 à 1885, les *moyennes annuelles* relatives aux divers intervalles quinquennaux successifs ([2]). Il comprend tous les appareils à vapeur en service en France, ainsi que les générateurs de locomotives, mais non ceux de la Marine militaire, de l'Algérie, ni des colonies. On n'a fait figurer comme blessés que les victimes ayant subi une incapacité de travail d'au moins vingt jours. Les accidents ont été répartis d'après les catégories qui nous ont servi ci-dessus, et qui sont conformes aux cadres administratifs. On ne s'étonnera pas de ne pouvoir en opérer la vérification d'après la colonne du total des explosions, car certains accidents rentrent à la fois dans plusieurs classes.

Le premier groupe horizontal se rapporte aux *chaudières* proprement dites, qui subissent le contact des flammes; le second aux *récipients* de plus de cent litres chauffés uniquement par la vapeur. La troisième présente, pour ordre, l'ensemble des deux catégories précédentes, bien qu'il y ait peu d'analogie entre les risques que toutes les deux font courir.

Le premier groupe vertical contient les *totaux absolus.* On les voit tout naturellement s'accroître avec les développements progressifs de l'industrie. La seconde partie renferme des *nombres pro-*

([1]) Voy. ci-dessus, p. 551, note.

([2]) On ne perdra pas de vue que les chiffres inscrits en regard de ces intervalles représentent, non pas le total des accidents survenus dans ce laps de temps, mais le cinquième de ce total, c'est-à-dire la *moyenne annuelle.*

INTERVALLES QUINQUENNAUX		APPAREILS EN SERVICE	ACCIDENTS	RÉPARTITION DES ACCIDENTS				VICTIMES			MOYENNE POUR 10 000 APPAREILS			
				DÉFAUTS de construction	DÉFAUTS d'entretien	DÉFAUTS de fonctionnement	CAUSES indéterminées	Tués	Blessés	TOTAL	ACCIDENTS	VICTIMES Tués	VICTIMES Blessés	VICTIMES TOTAL
CHAUDIÈRES	1866-70 .	35 295	14,0	2,6	4,0	7,0	1,8	18,8	21,2	40,0	4,0	5,4	6,2	11,6
	1871-75 .	44 017	21,0	8,2	8,6	7,4	2,0	25,0	31,6	56,6	4,7	5,5	7,0	12,5
	1876-80 .	57 538	23,8	5,4	10,0	9,2	1,2	26,8	34,4	41,2	4,2	4,7	6,0	10,7
	1881-85 .	72 617	24,6	5,6	10,8	12,6	1,0	30,8	39,8	70,6	3,4	4,2	4,1	8,3
RÉCIPIENTS	1866-70 .	25 820	3,2	0,6	0,0	2,4	0,0	2,0	1,8	3,8	1,2	0,8	0,7	1,5
	1871-75 .	23 205	4,8	2,4	0,8	2,4	0,2	4,2	4,2	8,4	2,1	1,8	1,7	3,5
	1876-80 .	22 153	5,6	1,8	1,2	2,6	0,6	6,0	5,4	11,4	2,6	2,6	2,2	4,8
	1881-85 .	22 429	6,8	1,8	2,2	3,8	0,2	3,2	2,6	5,8	3,0	1,4	1,1	2,5
TOTAL	1866-70 .	61 115	17,2	3,2	4,0	9,4	1,8	20,8	23,0	43,8	2,8	3,4	3,8	7,2
	1871-75 .	67 222	25,8	10,6	9,4	9,8	2,2	29,2	35,8	65,0	3,8	4,2	5,1	9,3
	1876-80 .	79 691	29,4	7,2	11,2	11,8	1,8	32,8	39,8	72,6	3,6	4,4	4,9	9,3
	1881-85 .	95 046	31,4	7,4	13,0	16,4	1,2	34,0	42,4	76,4	3,3	3,5	3,3	6,8

portionnels, qui tendent au contraire à diminuer, en mettant par là en évidence les progrès réalisés par le personnel et par la surveillance.

1185 — En ce qui concerne le Royaume-uni d'Angleterre ([1]), on peut indiquer les chiffres suivants pour un laps de temps de dix-huit années, presque égal au précédent ([2]).

Les nombres d'accidents ont été les suivants :

Défauts de construction	338
Défauts d'entretien	268
Défauts de fonctionnement	334
Causes diverses	76
TOTAL	1 016

et les nombres de victimes :

Tués	1 253
Blessés	1 943
TOTAL	3 196

1186 — Pour les locomotives en particulier ([3]), dans le même intervalle de temps que ci-dessus (1866 à 1885), on a enregistré les totaux suivants :

([1]) Marten. *Records of steam boiler explosions*, 1880.
([2]) S'étendant du 30 juin 1861 au 30 juin 1879.
([3]) Walckenaer. Explosions des chaudières locomotives. *Annales des mines*, 1887, 2e semestre, p. 361.

PAYS	ACCIDENTS	VICTIMES		
		TUÉS	BLESSÉS	TOTAL
France et Algérie.	14	6	20	26
Belgique	7	3	3	6
Hollande	1	2	0	2
Angleterre	64	34	93	127
États-Unis [1]	271	333	369	702

1. Pour permettre d'établir la comparaison, les nombres concernant les États-Unis devraient être majorés d'environ 1/9, car l'intervalle de temps s'étend seulement pour eux du 1er octobre 1867 au 31 décembre 1885, et en outre cette statistique risque d'être incomplète.

Une appréciation équitable ne pourrait d'ailleurs s'établir avec rigueur que sur des chiffres *proportionnels*, d'après les nombres de locomotives en mouvement dans ces divers pays. Cependant le résultat s'accuse suffisamment *a priori* en faveur de la France. On n'y compte qu'une seule explosion pour 40 000 années de service.

La sécurité, en France du moins, est donc beaucoup plus satisfaisante en ce qui concerne les locomotives que pour les machines fixes. Un tel résultat est bien propre à mettre en évidence l'influence salutaire de la régularité des soins et de la surveillance; car ces machines ont un système de construction plus compliqué et plus gêné, ainsi qu'un service d'une nature plus violente que les moteurs fixes.

CHAPITRE LXII

RÉGLEMENTATION

—

§ 1

REGLEMENTS

1187 — Les chaudières à vapeur pouvant créer un danger considérable, non seulement pour ceux qui s'en servent, mais pour les tiers qui habitent ou qui passent à proximité, le législateur et l'administration sont intervenus dans tous les pays pour en réglementer l'emploi. La sévérité des prescriptions, aussi bien que la part laissée à la liberté, ont d'ailleurs varié aux époques successives, d'après les progrès accomplis par les constructeurs, et l'habitude qui tend à familiariser la population avec un tel voisinage.

En ce qui concerne la France, MM. Hirsch et Debize ont présenté, dans leur remarquable traité [1], un répertoire chronologique des principaux textes relatifs à la matière. On y trouve une analyse sommaire de 87 textes de lois, ordonnances royales ou décrets, circulaires ou instructions ministérielles.

M. Delaunay-Belleville a publié de son côté un volume [2] renfermant les textes, annotés par lui, des lois et règlements concernant les chaudières à vapeur en France, ainsi qu'en Allemagne, Alsace-Lorraine, Angleterre, Autriche, Belgique, Danemark, Espagne, États-Unis, Hollande, Italie, Hongrie, Norvège, Portugal, Suède et Suisse [3].

[1] *Leçons sur les machines à vapeur*, t. I, p. 1016.
[2] Paris, un fort volume grand in-8°, de 886 pages, Bernard, 1886.
[3] Schmidt. *Législation des appareils à vapeur*, in-8°, 1881. — Coret. *La nouvelle législation des machines à vapeur*, in-16, 1881.

Indépendamment des textes de droit commun renfermés dans les Codes français [1], et de la loi pénale du 21 juillet 1856 concernant spécialement les contraventions aux règlements sur les appareils et bateaux à vapeur, il y a lieu de distinguer, pour l'application des textes encore en vigueur en France, les trois cas suivants :

1° Pour les *appareils fonctionnant à terre* : les décrets des 30 avril 1880 [2], et 29 juin 1886 [3].

2° Pour ceux de la *navigation fluviale* : le décret du 9 avril 1883 [4].

3° Pour ceux de la *navigation maritime* : l'ordonnance royale du 17 janvier 1846 [5].

On pourra trouver au besoin ces textes, ainsi que les instructions ministérielles destinées à les développer, dans la *partie administrative* des *Annales des mines*. Devant l'impossibilité d'insérer ici un tel nombre de documents et de commentaires, qui modifieraient complètement le caractère technique de ce Cours, nous nous bornerons à transcrire les deux décrets qui forment la base essentielle des prescriptions administratives pour les appareils fonctionnant à terre.

1°

DÉCRET DU 30 AVRIL 1880

Le Président de la République française,

Sur le rapport du Ministre des travaux publics;

Vu le décret du 25 janvier 1865, relatif aux chaudières à vapeur autres que celles qui sont placées sur des bateaux ;

Vu les avis de la Commission centrale des appareils à vapeur;

Le Conseil d'État entendu,

(1) MM. Hirsch et Debize rappellent spécialement à cet égard les articles 1382, 1383, 1384 du Code civil, ainsi que les articles 319, 320, 463, 471, 474, 484 du Code pénal.

(2) Commenté par le rapport au Président de la République qui lui est relatif, et par les circulaires des 21 juillet 1880, 13 février, 20 octobre 1883, 13 février 1884, 31 mars, 20 juin 1885, 23 août 1887, 14 août 1888.

(3) Avec circulaire du 6 septembre 1887.

(4) Avec circulaire du 30 avril 1883.

(5) Avec instructions des 5 et 6 juin de la même année, et un grand nombre de circulaires ultérieures sur ce sujet, qui échappe à notre cadre (voy. p. 389).

Décrète :

Art. 1er. — Sont soumis aux formalités et aux mesures prescrites par le présent règlement : 1° les générateurs de vapeur autres que ceux qui sont placés à bord des bateaux; 2° les récipients définis ci-après (Titre V).

TITRE Ier

MESURES DE SURETÉ RELATIVES AUX CHAUDIÈRES PLACÉES A DEMEURE

Art. 2. — Aucune chaudière neuve ne peut être mise en service qu'après avoir subi l'épreuve réglementaire ci-après définie. Cette épreuve doit être faite chez le constructeur et sur sa demande.

Toute chaudière venant de l'étranger est éprouvée avant sa mise en service, sur le point du territoire français désigné par le destinataire dans sa demande.

Art. 3. — Le renouvellement de l'épreuve peut être exigé de celui qui fait usage d'une chaudière :

1° Lorsque la chaudière, ayant déjà servi, est l'objet d'une nouvelle installation ;

2° Lorsqu'elle a subi une réparation notable;

3° Lorsqu'elle est remise en service après un chômage prolongé.

A cet effet, l'intéressé devra informer l'ingénieur des mines de ces diverses circonstances. En particulier, si l'épreuve exige la démolition du massif du fourneau ou l'enlèvement de l'enveloppe de la chaudière et un chômage plus ou moins prolongé, cette épreuve pourra ne point être exigée, lorsque des renseignements authentiques sur l'époque et les résultats de la dernière visite, intérieure et extérieure, constitueront une présomption suffisante en faveur du bon état de la chaudière. Pourront être notamment considérés comme renseignements probants les certificats délivrés aux membres des associations de propriétaires d'appareils à vapeur par celles de ces associations que le Ministre aura désignées.

Le renouvellement de l'épreuve est exigible également lorsque, à raison des conditions dans lesquelles une chaudière fonctionne, il y a lieu, par l'ingénieur des mines, d'en suspecter la solidité.

Dans tous les cas, lorsque celui qui fait usage d'une chaudière contestera la nécessité d'une nouvelle épreuve, il sera, après une instruction où celui-ci sera entendu, statué par le préfet.

En aucun cas, l'intervalle entre deux épreuves consécutives n'est supérieur à dix années. Avant l'expiration de ce délai, celui qui fait usage d'une chaudière à vapeur doit lui-même demander le renouvellement de l'épreuve.

Art. 4. — L'épreuve consiste à soumettre la chaudière à une pression hydraulique supérieure à la pression effective qui ne doit point être dépassée dans le service. Cette pression d'épreuve sera maintenue pendant le temps nécessaire à l'examen de la chaudière, dont toutes les parties doivent pouvoir être visitées.

La surcharge d'épreuve par centimètre carré est égale à la pression effective, sans jamais être inférieure à un demi-kilogramme ni supérieure à 6 kilogrammes.

L'épreuve est faite sous la direction de l'ingénieur des mines et en sa présence, ou, en cas d'empêchement, en présence du garde-mines opérant d'après ses instructions.

Elle n'est pas exigée pour l'ensemble d'une chaudière dont les diverses parties, éprouvées séparément, ne doivent être réunies que par des tuyaux placés, sur tout leur parcours, en dehors du foyer et des conduits de flamme, et dont les joints peuvent être facilement démontés.

Le chef de l'établissement où se fait l'épreuve fournit la main-d'œuvre et les appareils nécessaires à l'opération.

Art. 5. — Après qu'une chaudière ou partie de chaudière a été éprouvée avec succès, il y est apposé un timbre, indiquant en kilogrammes par centimètre carré la pression effective que la vapeur ne doit pas dépasser.

Les timbres sont poinçonnés et reçoivent trois nombres indiquant le jour, le mois et l'année de l'épreuve.

Un de ces timbres est placé de manière à être toujours apparent après la mise en place de la chaudière.

Art. 6. — Chaque chaudière est munie de deux soupapes de sûreté, chargées de manière à laisser la vapeur s'écouler dès que sa pression effective atteint la limite maximum indiquée par le timbre réglementaire.

L'orifice de chacune des soupapes doit suffire à maintenir, celle-ci étant au besoin convenablement déchargée ou soulevée, et quelle que soit l'activité du feu, la vapeur dans la chaudière à un degré de pression qui n'excède pour aucun cas la limite ci-dessus.

Le constructeur est libre de répartir, s'il le préfère, la section totale d'écoulement nécessaire des deux soupapes réglementaires entre un plus grand nombre de soupapes.

Art. 7. — Toute chaudière est munie d'un manomètre en bon état placé en vue du chauffeur et gradué de manière à indiquer, en kilogrammes, la pression effective de la vapeur dans la chaudière.

Une marque très apparente indique sur l'échelle du manomètre la limite que la pression effective ne doit point dépasser.

La chaudière est munie d'un ajutage terminé par une bride de $0^m,04$ de diamètre et $0^m,005$ d'épaisseur disposée pour recevoir le manomètre vérificateur.

Art. 8. — Chaque chaudière est munie d'un appareil de retenue, soupape ou clapet, fonctionnant automatiquement et placé au point d'insertion du tuyau d'alimentation qui lui est propre.

Art. 9. — Chaque chaudière est munie d'une soupape ou d'un robinet d'arrêt de vapeur, placé autant que possible à l'origine du tuyau de conduite de vapeur, sur la chaudière même.

Art. 10. — Toute paroi en contact par une de ses faces avec la flamme doit être baignée par l'eau sur sa face opposée.

Le niveau de l'eau doit être maintenu, dans chaque chaudière, à une hauteur de marche telle qu'il soit, en toute circonstance, à $0^m,06$ au moins au-dessus du plan pour lequel la condition précédente cesserait d'être remplie. La position

limite sera indiquée, d'une manière très apparente, au voisinage du tube de niveau mentionné à l'article suivant.

Les prescriptions énoncées au présent article ne s'appliquent point :

1° Aux surchauffeurs de vapeur distincts de la chaudière;

2° A des surfaces relativement peu étendues et placées de manière à ne jamais rougir, même lorsque le feu est poussé à son maximum d'activité, telles que les tubes ou parties de cheminées qui traversent le réservoir de vapeur, en envoyant directement à la cheminée principale les produits de la combustion.

Art. 11. — Chaque chaudière est munie de deux appareils indicateurs du niveau de l'eau indépendants l'un de l'autre, et placés en vue de l'ouvrier chargé de l'alimentation.

L'un de ces deux indicateurs est un tube en verre, disposé de manière à pouvoir être facilement nettoyé et remplacé au besoin.

Pour les chaudières verticales de grande hauteur, le tube en verre est remplacé par un appareil disposé de manière à reporter, en vue de l'ouvrier chargé de l'alimentation, l'indication du niveau de l'eau dans la chaudière.

TITRE II

ÉTABLISSEMENT DES CHAUDIÈRES A VAPEUR PLACÉES A DEMEURE

Art. 12. — Toute chaudière à vapeur destinée à être employée à demeure ne peut être mise en service qu'après une déclaration adressée, par celui qui fait usage du générateur, au préfet du département. Cette déclaration est enregistrée à sa date. Il en est donné acte. Elle est communiquée sans délai à l'ingénieur en chef des mines.

Art. 13. — La déclaration fait connaître avec précision :

1° Le nom et le domicile du vendeur de la chaudière ou l'origine de celle-ci;

2° La commune et le lieu où elle est établie;

3° La forme, la capacité et la surface de chauffe;

4° Le numéro du timbre réglementaire;

5° Un numéro distinctif de la chaudière, si l'établissement en possède plusieurs;

6° Enfin le genre d'industrie et l'usage auxquels elle est destinée.

Art. 14. — Les chaudières sont divisées en trois catégories :

Cette classification est basée sur le produit de la multiplication du nombre exprimant en mètres cubes la capacité totale de la chaudière avec ses bouilleurs et ses réchauffeurs alimentaires, mais sans y comprendre les surchauffeurs de vapeur, par le nombre exprimant, en degrés centigrades, l'excès de la température de l'eau correspondant à la pression indiquée par le timbre réglementaire sur la température de 100 degrés, conformément à la table annexée au présent décret.

Si plusieurs chaudières doivent fonctionner ensemble dans un même emplacement, et si elles ont entre elles une communication quelconque, directe ou indirecte, on prend, pour former le produit, comme il vient d'être dit, la somme des capacités de ces chaudières.

Les chaudières sont de la première catégorie quand le produit est plus grand que 200; de la deuxième, quand le produit n'excède pas 200, mais surpasse 50; de la troisième, si le produit n'excède pas 50.

Art. 15. — Les chaudières comprises dans la première catégorie doivent être établies en dehors de toute maison d'habitation et de tout atelier surmonté d'étages. N'est pas considérée comme un étage, au-dessus de l'emplacement d'une chaudière, une construction dans laquelle ne se fait aucun travail nécessitant la présence d'un personnel à poste fixe.

Art. 16. — Il est interdit de placer une chaudière de première catégorie à moins de 3 mètres d'une maison d'habitation.

Lorsqu'une chaudière de première catégorie est placée à moins de 10 mètres d'une maison d'habitation, elle en est séparée par un mur de défense.

Ce mur, en bonne et solide maçonnerie, est construit de manière à défiler la maison par rapport à tout point de la chaudière distant de moins de 10 mètres, sans toutefois que sa hauteur dépasse de 1 mètre la partie la plus élevée de la chaudière. Son épaisseur est égale au tiers au moins de sa hauteur, sans que cette épaisseur puisse être inférieure à 1 mètre en couronne. Il est séparé du mur de la maison voisine par un intervalle libre de 30 centimètres de largeur au moins.

L'établissement d'une chaudière de première catégorie à la distance de 10 mètres ou plus d'une maison d'habitation n'est assujetti à aucune condition particulière.

Les distances de 3 mètres et de 10 mètres, fixées ci-dessus, sont réduites respectivement à $1^m,50$ et à 5 mètres lorsque la chaudière est enterrée, de façon que la partie supérieure de ladite chaudière se trouve à 1 mètre en contre-bas du sol du côté de la maison voisine.

Art. 17. — Les chaudières comprises dans la deuxième catégorie peuvent être placées dans l'intérieur de tout atelier, pourvu que l'atelier ne fasse pas partie d'une maison d'habitation.

Les foyers sont séparés des murs des maisons voisines par un intervalle libre de 1 mètre au moins.

Art. 18. — Les chaudières de troisième catégorie peuvent être établies dans un atelier quelconque, même lorsqu'il fait partie d'une maison d'habitation.

Les foyers sont séparés des murs des maisons voisines par un intervalle libre de $0^m,50$ au moins.

Art. 19. — Les conditions d'emplacement prescrites pour les chaudières à demeure, par les précédents articles, ne sont pas applicables aux chaudières pour l'établissement desquelles il aura été satisfait au décret du 25 janvier 1865, antérieurement à la promulgation du présent règlement.

Art. 20. — Si, postérieurement à l'établissement d'une chaudière, un terrain contigu vient à être affecté à la construction d'une maison d'habitation, celui qui fait usage de la chaudière devra se conformer aux mesures prescrites par les articles 16, 17 et 18, comme si la maison eût été construite avant l'établissement de la chaudière.

Art. 21. — Indépendamment des mesures générales de sûreté prescrites au titre Ier, et de la déclaration prévue par les articles 12 et 13, les chaudières à vapeur fonctionnant dans l'intérieur des mines sont soumises aux conditions que pourra prescrire le préfet, suivant les cas et sur le rapport de l'ingénieur des mines.

TITRE III

CHAUDIÈRES LOCOMOBILES

Art. 22. — Sont considérées comme locomobiles les chaudières à vapeur qui peuvent être transportées facilement d'un lieu dans un autre, n'exigent aucune construction pour fonctionner sur un point donné, et ne sont employées que d'une manière temporaire à chaque station.

Art. 23. — Les dispositions des articles 2 à 11 inclusivement du présent décret sont applicables aux chaudières locomobiles.

Art. 24. — Chaque chaudière porte une plaque sur laquelle sont gravés, en caractères très apparents, le nom et le domicile du propriétaire et un numéro d'ordre, si ce propriétaire possède plusieurs chaudières locomobiles.

Art. 25. — Elle est l'objet de la déclaration prescrite par les articles 12 et 13. Cette déclaration est adressée au préfet du département où est le domicile du propriétaire.

L'ouvrier chargé de la conduite devra représenter à toute réquisition le récépissé de cette déclaration.

TITRE IV

CHAUDIÈRES DES MACHINES LOCOMOTIVES

Art. 26. — Les machines à vapeur locomotives sont celles qui, sur terre, travaillent en même temps qu'elles se déplacent par leur propre force, telles que les machines des chemins de fer et des tramways, les machines routières, les rouleaux compresseurs, etc.

Art. 27. — Les dispositions des articles 2 à 8 inclusivement, et celles des articles 11 et 24 sont applicables aux chaudières des machines locomotives.

Art. 28. — Les dispositions de l'article 25, paragraphe 1er, s'appliquent également à ces chaudières.

Art. 29. — La circulation des machines locomotives a lieu dans les conditions déterminées par des règlements spéciaux.

TITRE V

RÉCIPIENTS

Art. 30. — Sont soumis aux dispositions suivantes les récipients de formes diverses d'une capacité de plus de 100 litres, au moyen desquels les matières à

élaborer sont chauffées, non directement à feu nu, mais par de la vapeur empruntée à un générateur distinct, lorsque leur communication avec l'atmosphère n'est point établie par des moyens excluant toute pression effective nettement appréciable.

Art. 31. — Ces récipients sont assujettis à la déclaration prescrite par les articles 12 et 13.

Ils sont soumis à l'épreuve, conformément aux articles 2, 3, 4 et 5. Toutefois la surcharge d'épreuve sera, dans tous les cas, égale à la moitié de la pression maximum à laquelle l'appareil doit fonctionner, sans que cette surcharge puisse excéder 4 kilogrammes par centimètre carré.

Art. 32. — Ces récipients sont munis d'une soupape de sûreté réglée pour la pression indiquée par le timbre, à moins que cette pression ne soit égale ou supérieure à celle fixée pour la chaudière alimentaire.

L'orifice de cette soupape, convenablement déchargée ou soulevée au besoin, doit suffire à maintenir pour tous les cas la vapeur dans le récipient à un degré de pression qui n'excède pas la limite du timbre.

Elle peut être placée, soit sur le récipient lui-même, soit sur le tuyau d'arrivée de la vapeur, entre le robinet et le récipient.

Art. 33. — Les dispositions des articles 30, 31 et 32 s'appliquent également aux réservoirs dans lesquels de l'eau à haute température est emmagasinée, pour fournir ensuite un dégagement de vapeur ou de chaleur quel qu'en soit l'usage.

Art. 34. — Un délai de six mois, à partir de la promulgation du présent décret, est accordé pour l'exécution des quatre articles qui précèdent.

TITRE VI

DISPOSITIONS GÉNÉRALES

Art. 35. — Le Ministre peut, sur le rapport des ingénieurs des mines, l'avis du préfet et celui de la Commission centrale des machines à vapeur, accorder dispense de tout ou partie des prescriptions du présent décret dans tous les cas où, à raison soit de la forme, soit de la faible dimension des appareils, soit de la position spéciale des pièces contenant de la vapeur, il serait reconnu que la dispense ne peut pas avoir d'inconvénient.

Art. 36. — Ceux qui font usage de générateurs ou de récipients de vapeur veilleront à ce que ces appareils soient entretenus constamment en bon état de service.

A cet effet, ils tiendront la main à ce que des visites complètes, tant à l'intérieur qu'à l'extérieur, soient faites à des intervalles rapprochés pour constater l'état des appareils et assurer l'exécution en temps utile des réparations ou remplacements nécessaires.

Ils devront informer les ingénieurs des réparations notables faites aux chau-

dières et aux récipients, en vue de l'exécution des articles 3 (1°, 2° et 3°) et 31, § 2.

Art. 37. — Les contraventions au présent règlement sont constatées, poursuivies et réprimées conformément aux lois.

Art. 38. — En cas d'accident ayant occasionné la mort ou des blessures, le chef de l'établissement doit prévenir immédiatement l'autorité chargée de la police locale et l'ingénieur des mines chargé de la surveillance. L'ingénieur se rend sur les lieux, dans le plus bref délai, pour visiter les appareils, en constater l'état et rechercher les causes de l'accident. Il rédige sur le tout :

1° Un rapport qu'il adresse au procureur de la République et dont une expédition est transmise à l'ingénieur en chef, qui fait parvenir son avis à ce magistrat;

2° Un rapport qui est adressé au préfet, par l'intermédiaire et avec l'avis de l'ingénieur en chef.

En cas d'accident n'ayant occasionné ni mort ni blessure, l'ingénieur des mines seul est prévenu; il rédige un rapport qu'il envoie, par l'intermédiaire et avec l'avis de l'ingénieur en chef, au préfet.

En cas d'explosion, les constructions ne doivent point être réparées et les fragments de l'appareil rompu ne doivent point être déplacés ou dénaturés avant la constatation de l'état des lieux par l'ingénieur.

Art. 39. — Par exception, le Ministre pourra confier la surveillance des appareils à vapeur aux ingénieurs ordinaires et aux conducteurs des ponts et chaussées, sous les ordres de l'ingénieur en chef des mines de la circonscription.

Art. 40. — Les appareils à vapeur qui dépendent des services spéciaux de l'État sont surveillés par les fonctionnaires et agents de ces services.

Art. 41. — Les attributions conférées aux préfets des départements par le présent décret sont exercées par le préfet de police dans toute l'étendue de son ressort.

Art. 42. — Est rapporté le décret du 25 janvier 1865.

Art. 43. — Le Ministre des travaux publics est chargé de l'exécution du présent décret, qui sera inséré au *Journal officiel* et au *Bulletin des lois*.

Table de température.

VALEURS CORRESPONDANTES		VALEURS CORRESPONDANTES		VALEURS CORRESPONDANTES	
de la PRESSION EFFECTIVE en kilogrammes	de la TEMPÉRATURE en degrés centigrades	de la PRESSION EFFECTIVE en kilogrammes	de la TEMPÉRATURE en degrés centigrades	de la PRESSION EFFECTIVE en kilogrammes	de la TEMPÉRATURE en degrés centigrades
0.5	111	7.5	173	14.5	190
1.0	120	8.0	175	15.0	200
1.5	127	8.5	177	15.5	202
2.0	133	9.0	179	16.0	203
2.5	138	9.5	181	16.5	205
3.0	143	10.0	183	17.0	206
3.5	147	10.5	185	17.5	208
4.0	151	11.0	187	18.0	209
4.5	155	11.5	180	18.5	210
5.0	158	12.0	191	19.0	211
5.5	161	12.5	193	19.5	213
6.0	164	13.0	194	20.0	214
6.5	167	13.5	196	»	»
7.0	170	14.0	197	»	»

2°

DÉCRET DU 29 JUIN 1886

Le Président de la République française,

Sur le rapport du Ministre des Travaux publics;

Vu la loi du 21 juillet 1856;

Vu le décret du 30 avril 1880 relatif aux chaudières à vapeur autres que celles qui sont placées sur des bateaux;

Vu l'avis de la Commission centrale des machines à vapeur, en date du 4 février 1886;

Le Conseil d'État entendu,

Decrète :

ART. 1er. — Lorsque plusieurs générateurs de vapeur, placés à demeure, sont groupés sur une conduite générale de vapeur, en nombre tel que le produit, formé comme il est dit à l'article 14 du décret du 30 avril 1880, en prenant comme base du calcul le timbre réglementaire le plus élevé, dépasse le nombre 1800, lesdits générateurs sont répartis par séries correspondant chacune à un

produit au plus égal à ce nombre. Chaque série est munie d'un clapet automatique d'arrêt, disposé de façon à éviter, en cas d'explosion, le déversement de la vapeur des séries restées intactes.

Art. 2. — Lorsqu'un générateur de première catégorie est chauffé par les flammes perdues d'un ou plusieurs fours métallurgiques, tout le courant des gaz chauds doit, en arrivant au contact des tôles, être dirigé tangentiellement aux parois de la chaudière.

A cet effet, si les rampants destinés à amener les flammes ne sont pas construits de façon à assurer ce résultat, les tôles exposées aux coups de feu sont protégées, en face des débouchés des rampants dans les carneaux, par des murettes en matériaux réfractaires, distantes des tôles d'au moins 50 millimètres, et suffisamment étendues dans tous les sens pour que les courants de gaz chauds prennent des directions sensiblement tangentielles aux surfaces des tôles voisines, avant de les toucher.

Art. 3. — Les dispositions de l'art. 35 du décret du 30 avril 1880 sont applicables aux prescriptions du présent règlement.

Art. 4. — Un délai de six mois est accordé aux propriétaires des chaudières existant antérieurement à la promulgation du présent règlement pour se conformer aux prescriptions ci-dessus.

Art. 5. — Le Ministre des Travaux publics est chargé de l'exécution du présent décret, qui sera inséré au *Journal officiel* et au *Bulletin des lois*.

§ 2

EMPLACEMENT DES CHAUDIÈRES

1188 — Les ingénieurs des mines sont chargés en particulier de l'instruction des affaires concernant l'établissement des appareils à vapeur, et les demandes de dérogations. Il s'en faut en effet de beaucoup que le choix de l'emplacement et des dispositions soit laissé à l'arbitraire de chacun. Le décret du 30 avril 1880 impose à cet égard de nombreuses prescriptions, dont il ne sera pas inutile d'esquisser un résumé, en renvoyant d'ailleurs aux textes eux-mêmes.

A cet égard, les appareils à vapeur soumis à la réglementation publique (n° 1187) sont distingués en deux sortes : les *chaudières* proprement dites et les *récipients*. Ces derniers sont définis par l'article 30, comme des vases de forme quelconque et d'une capacité de plus de 100 litres, chauffés, non à feu nu, mais à l'aide de

la vapeur d'un générateur distinct, lorsque leur communication avec l'atmosphère n'est point établie par des moyens excluant toute pression effective nettement appréciable.

Les générateurs sont de leur côté répartis par l'article 14 en trois catégories. Cette classification est basée sur la valeur numérique du produit de la capacité totale évaluée en mètres cubes, par l'excès sur le nombre 100 de la température centigrade qui correspond à la pression du timbre [1]. On comprend dans cette capacité les bouilleurs et les réchauffeurs alimentaires, mais non les surchauffeurs de vapeur. Pour une batterie de plusieurs générateurs fonctionnant ensemble dans un même emplacement, où ils ont entre eux une communication quelconque, on ajoute ensemble toutes les capacités.

Les chaudières sont de première catégorie, si le produit en question est supérieur à 200 [2]. Pour la seconde, il n'excède pas 200, mais il est supérieur à 50. Pour la troisième, il ne dépasse pas 50.

Les chaudières de première catégorie doivent être établies en dehors de toute maison d'habitation, et de tout atelier surmonté d'étages. Toutefois l'on ne considère pas comme un étage une construction située au-dessus d'un générateur, et dans laquelle il ne se fait aucun travail nécessitant la présence d'un personnel à poste fixe. Ces générateurs ne peuvent se mettre à moins de 3 mètres d'une maison d'habitation; et si la distance ne dépasse pas 10 mètres, l'exploitant doit élever un mur de défense, dont l'article 16 définit en détail les proportions (p. 798).

Les chaudières de seconde catégorie peuvent être placées dans l'intérieur de tout atelier, pourvu qu'il ne fasse pas partie d'une maison d'habitation. Leurs foyers seront séparés des murs des maisons voisines par un intervalle libre d'un mètre au moins (voy. article 17).

(1) Voir la table de températures annexée au texte du décret (p. 802). Il est bien essentiel de ne pas confondre ce tableau de *pressions effectives* avec les tables de *tensions de vapeur* (voy. t. I, p. 777).

(2) Le décret du 29 juin 1886 a prévu en outre, dans son article 1er, le cas où le produit total dépasserait 1800. Il exige alors la subdivision de l'ensemble en séries, de produit caractéristique au plus égal à ce nombre. Chacune d'elles doit être munie d'un clapet automatique d'arrêt, disposé de façon à éviter, en cas d'explosion, le déversement de la vapeur des séries restées intactes.

Les chaudières de troisième catégorie ne sont plus astreintes à la même prohibition; et, pour elles, l'intervalle est réduit à 0 m. 50 (voy. article 18).

Si l'on vient à construire ultérieurement des maisons d'habitation sur les terrains contigus, l'exploitant est tenu de se mettre à nouveau en règle avec les prescriptions précédentes (voy. article 20).

D'après l'article 35, le Ministre des Travaux publics peut, dans des formes déterminées, accorder certaines dispenses pour des cas spéciaux où il est reconnu qu'elles ne peuvent offrir d'inconvénients.

La mise en service d'un appareil à vapeur est nécessairement précédée d'une déclaration qui est adressée au Préfet, et dont le détail est défini par les articles 12, 13 et 31.

§ 3

ÉPREUVE RÉGLEMENTAIRE

1189 — Le décret du 30 avril 1880 prescrit, par ses articles 2, 3, 4, 5 et 30, une épreuve [1] que tout appareil à vapeur doit subir réglementairement à divers moments, à savoir : 1° chez le constructeur, quand il est neuf [2]; 2° si cet appareil, ayant déjà servi, devient l'objet d'une nouvelle installation; 3° lorsqu'il a subi une réparation notable; 4° quand il est remis en service après un chômage prolongé; 5° lorsque, à raison des conditions dans lesquelles une chaudière fonctionne, il y a lieu, par l'ingénieur des mines, d'en suspecter la solidité; 6° dans tous les cas, au bout de dix ans après la dernière épreuve subie [3].

L'essai est effectué sous la direction de l'ingénieur des mines, ou du contrôleur des mines délégué par lui.

[1] Huet. Notice historique sur l'épreuve des chaudières à vapeur (*Revue technique de l'Exposition de* 1889, 6e partie, t. I, p. 511. — *Congrès de mécanique appliquée de* 1889, t. III, p. 77). — Bonnet. Emploi de l'injecteur pour les épreuves des chaudières. *Comptes rendus mensuels des séances de la Société de l'industrie minérale de Saint-Étienne*, 1885, p. 25.

[2] Si le générateur vient de l'étranger, le destinataire indique lui-même dans sa demande le point du territoire sur lequel il désire que soit effectuée l'épreuve.

[3] Sauf ce dernier cas, il peut être usé de tolérance pour dispenser de l'epreuve dans les conditions déterminées par l'article 3 du décret du 30 avril 1880.

Il consiste à soumettre l'appareil à une pression hydraulique à froid, prolongée pendant le temps nécessaire à l'examen de la chaudière, dont toutes les parties doivent pouvoir être visitées (1).

La pression d'épreuve dépend de celle en vue de laquelle sera timbré le *générateur*, sur la demande de l'intéressé. La *surcharge* d'épreuve par centimètre carré est égale à la pression effective elle-même, sans jamais devenir inférieure à un demi-kilogramme, ni supérieure à six kilogrammes (2). Pour les *récipients* définis par l'article 30 du décret du 30 avril 1880, la surcharge est égale à la moitié de la pression maximum, sans pouvoir toutefois excéder 4 kilogrammes par centimètre carré.

Cette pression est observée à l'aide d'un manomètre, gradué lui-même par pression à froid (3). Chaque chaudière sera munie à cet effet d'un ajutage, dont les dimensions sont déterminées par l'article 7, et qui est destiné à recevoir le manomètre de l'Administration.

On réalise la tension voulue au moyen d'une pompe de compression, qui doit être fournie par l'industriel, ainsi que la main-d'œuvre nécessaire. La chaudière est remplie d'eau d'une manière complète. On évite avec soin la formation de chambres d'air, qui entraîneraient des inconvénients, et parfois même des accidents ; l'air en tension pouvant, en cas de rupture, déterminer des projections que l'on n'a pas à redouter avec le liquide. Il faut pomper doucement, surtout vers la fin.

(1) En ce qui concerne la démolition des maçonneries, qui est toujours exigible, la circulaire ministérielle du 23 août 1887 autorise une tolérance dans certains cas particuliers, lorsque les carneaux, très larges et ouverts de place en place, laissent réellement voir toutes les parties de la chaudière, sans que l'on soit forcé de s'y glisser dans une situation rendant impossible tout examen approfondi.

(2) L'ancien décret du 25 janvier 1865 imposait des surcharges qui pouvaient devenir excessives, et risquaient alors de fatiguer abusivement le métal et les assemblages, en allant ainsi directement contre le but que l'on s'était proposé. M. Vinçotte n'a pas craint d'énoncer dans le Congrès de 1877 des ingénieurs en chef des associations de propriétaires d'appareils à vapeur, que des explosions dues à un manque de résistance étaient fréquemment signalées dans les premiers temps qui suivent l'épreuve.

(3) Autrefois on calait l'une des soupapes de sûreté, en chargeant l'autre au degré correspondant à la pression voulue. Puis l'on foulait, jusqu'à ce que l'eau sortît en nappe bien jaillissante, que l'on maintenait pendant toute la durée de l'examen. Cet état dynamique ne présentait pas les mêmes garanties de précision qu'un mode purement statique (Couche. *Voie, matériel roulant, exploitation technique des chemins de fer*, t. III, p. 169).

L'expérimentateur examine attentivement toutes les parties du générateur. Des fuites ou des déformations permanentes font refuser le timbre. Les suintements que l'on peut étancher au marteau, les altérations légères qui rentrent ensuite d'elles-mêmes dans la forme normale peuvent être tolérés.

Un timbre est apposé sur la chaudière, et poinçonné par le contrôleur des mines. Il indique la pression effective qui ne doit pas être dépassée, et porte trois nombres désignant le jour, le mois et l'année de l'épreuve. Il faut que ce timbre reste apparent après la mise en place de l'appareil.

Un procès-verbal est rédigé; une expédition en est remise à l'intéressé. L'ingénieur y signale les incidents qui se sont produits, ainsi que les détails de construction qui lui paraîtraient défectueux, tels que armatures insuffisantes, assemblages mal exécutés, épaisseurs d'eau trop restreintes, etc.

En outre un état d'épreuve est adressé par l'ingénieur en chef des mines à son collègue par l'intermédiaire des préfets, lorsque la chaudière doit être utilisée en dehors de son propre service. L'instruction ministérielle du 18 juillet 1890 en a défini le type.

§ 4

ENQUÊTES SUR LES EXPLOSIONS

1190 — Un troisième devoir essentiel du Corps des Mines, en ce qui concerne le service des appareils à vapeur, consiste dans l'enquête réglementaire qui doit toujours suivre un accident.

Le chef de l'établissement qui en a été le théâtre a, en pareil cas, le devoir d'avertir immédiatement l'ingénieur des mines [1]. L'emplacement doit rester en l'état. En dehors du sauvetage des personnes, rien n'y sera déplacé, dénaturé ou réparé avant l'arrivée de l'ingénieur. Celui-ci se rend sur les lieux dans le plus bref délai possible, pour constater l'état des choses et rechercher les causes de la catastrophe. Il rédige à ce sujet en premier lieu un rapport

[1] Et en outre, s'il y a mort ou blessure, l'autorité chargée de la police locale.

sommaire, qu'il adresse à la fois au procureur de la République [1] et à l'ingénieur en chef des mines, afin que celui-ci fasse également parvenir son appréciation au parquet; et ultérieurement un rapport technique détaillé, que l'Administration supérieure reçoit par l'intermédiaire du préfet, avec l'avis de l'ingénieur en chef.

L'enquête doit être conduite avec prudence et célérité, afin que l'état des lieux ne puisse être modifié par l'action du temps ou des personnes, et peut-être même les témoins sollicités et circonvenus. L'audition de ces derniers, et au besoin leurs confrontations les uns avec les autres, réclament beaucoup de soin et de patience. Elles apporteront souvent la lumière, mais parfois aussi des obscurités dues à une émotion naturelle en un pareil moment, à l'illusion, à l'inintelligence, autant qu'à la dissimulation et à la crainte de se compromettre. L'interrogatoire des blessés exige encore plus de précautions et de réserve.

L'examen des objets matériels fournira généralement des résultats plus précis et plus sûrs. A l'aide des plans, on reconstitue la scène avant l'accident. On note les emplacements des débris, la violence des effets mécaniques, qui peut éclairer sur la quantité d'eau restant dans l'appareil au moment de l'explosion. On relève la forme des déchirures, en pleine tôle ou suivant les clouures. On examine la tranche des fragments, pour y découvrir, s'il y a lieu, la trace d'anciennes fissures au milieu des ruptures fraîches, et pour juger de la nature du métal, et des corrosions qu'il peut avoir subies. On constate le degré d'entartrement (si les incrustations n'ont pas été détachées de la tôle par la violence du choc), ainsi que les traces de coup de feu pour les pièces qui ne sont pas restées exposées à l'action du foyer après l'explosion.

Les appareils de sûreté doivent être recherchés et examinés minutieusement, afin de permettre de constater si leur état est de nature à disculper le chauffeur, ou tout au contraire à lui être opposé comme charge d'accusation. Les renseignements verbaux fournis par les témoins pourront parfois éclairer sur les indications que présentaient ces appareils un peu avant le désastre.

[1] En cas de mort ou de blessure.

Il y aura lieu d'essayer à loisir, par les procédés en usage, des éprouvettes prélevées dans le métal avec les précautions convenables, afin de se fixer sur sa nature originaire ou progressivement altérée. On aura soin de les prendre en dehors des parties manifestement affectées par les effets de l'explosion. On pratiquera des coupes dans les assemblages suspectés. On exécutera des dessins soignés d'ensemble et de détail. Il faudra rechercher également l'historique de la chaudière, les dates de sa construction, de ses réparations, des épreuves qu'elle a subies, ainsi que les noms de leurs auteurs. On mentionnera, s'il y a lieu, l'association de propriétaires d'appareils à vapeur à laquelle l'établissement est affilié.

Les rapports des ingénieurs formulent des conclusions relativement aux suites, tant judiciaires qu'administratives, que l'affaire leur paraît comporter. La Justice remplit de son côté sa mission souveraine, et le dossier administratif est soumis d'autre part à l'examen de la Commission centrale des machines à vapeur, qui en dégage les enseignements, approuve ou critique les conclusions des ingénieurs, et décide en particulier si cet événement doit, à son avis, figurer ou non à la statistique des accidents des appareils à vapeur.

§ 5

ASSOCIATIONS DE PROPRIÉTAIRES DE CHAUDIÈRES A VAPEUR

1191 — Nous avons vu à quel point la sécurité des appareils à vapeur est étroitement liée à une active surveillance, dirigée par des ingénieurs spécialement compétents. On doit donc signaler comme l'une des plus utiles créations, sous ce rapport, celle des *Associations de Propriétaires d'appareils à vapeur* [1].

[1] Aguillon. Sur les associations de propriétaires d'appareils à vapeur. *Annales des mines*, 7e série, t. XVII, Bulletin, p. 527. — Bour. Conférence sur les progrès réalisés par les associations de propriétaires d'appareils à vapeur. *Congrès de mécanique appliquée de* 1889, t. III, p. 19. — Compère. *Congrès international des accidents du travail*, septembre 1889. — Jourdain (*Mémoires de la Société des Ingénieurs civils*, 1881, t. I, p. 505. — *Portefeuille économique des machines*, 1882, p. 118). — *Revue technique de l'Exposition de* 1889, 6e partie, t. I, p. 419, 453. — *Associazione fra i proprietari di caldaie a vapore nella provincia di Ferrara*, schema di statuto. Ferrare, in-8°, 1891.

Ces Sociétés sont absolument libres, et nul n'est tenu d'y entrer. Une cotisation annuelle, proportionnée au nombre des générateurs de chaque établissement industriel, procure à ce matériel la surveillance d'inspecteurs expérimentés, dirigés par l'ingénieur en chef de l'association. Leurs visites sont en général annuelles. On en fait même autant que possible deux par an, l'une complète, l'autre extérieure seulement. Une note remise au propriétaire lui indique l'état de ses générateurs, ainsi que les réparations qu'il est urgent d'y apporter. Les ingénieurs donnent également des conseils relatifs au bon emploi des appareils, et à l'économie en ce qui concerne soit le combustible, soit les réparations faites à temps sans laisser s'aggraver l'état des choses. Ils peuvent aussi se charger de missions spéciales, sur la demande des intéressés.

La plupart de ces Sociétés publient un bulletin; et des réunions périodiques de leurs ingénieurs en chef deviennent, sous le nom de congrès, l'occasion de délibérations qui sont résumées dans des publications fort instructives.

1192 — L'idée première de ces associations est née en Angleterre, avec la *Manchester steam Users Association*, créée en 1855 par Fairbairn. En 1867, fut fondée en France l'association de Mulhouse, puis à sa suite dix autres, dont le tableau suivant présente la situation au 1er mai 1889 [1].

Les chaudières du territoire français ne figurent guère que pour un tiers dans le chiffre de l'Association alsacienne, qui étend en outre son action sur l'Alsace-Lorraine et sur le grand-duché du Luxembourg. Pour l'ensemble de la France, les chaudières affiliées représentent environ le huitième du total des générateurs en service.

[1] Hirsch et Debize. *Leçons sur les machines à vapeur*, t. I, p. 1011, d'après les indications de Cornut. — *Revue technique de l'Exposition universelle de* 1889, 6e partie, t. I, p. 477.

FONDATION	ASSOCIATIONS	SIÈGE SOCIAL	ADHÉRENTS	CHAUDIÈRES
1873	du Nord de la France	Lille	750	3 021
1867	Alsacienne	Mulhouse	668	2 729
1876	Lyonnaise	Lyon	420	1 512
1874	Parisienne	Paris	391	1 105
1874	de la Somme, de l'Aisne et de l'Oise	Amiens	305	1 075
1874	Normande	Rouen	222	710
1878	de l'Ouest	Nantes	215	613
1882	du Sud-Est	Marseille	80	511
1882	du Nord-Est	Reims	153	510
1879	du Sud-Ouest	Bordeaux	102	340
1889	Méridionale	Montpellier	76	146
	TOTAUX	. . . . .	3 382	12 272

1193 — Les associations ont obtenu d'excellents résultats, et bien qu'elles ne suppriment pas juridiquement la responsabilité des exploitants, elles améliorent la situation de ces derniers, et allègent leurs préoccupations dans une large mesure.

En présence de cette situation, ainsi que de la charge écrasante et toujours croissante que la surveillance des appareils à vapeur impose au personnel et aux agents du Corps des Mines, en raison des développements de l'industrie, l'Administration a reconnu en principe à celles des associations qui auront donné des preuves suffisantes, une sorte de caractère officiel qui les associe, dans une certaine mesure, aux opérations des ingénieurs des mines. L'article 3 du décret du 30 avril 1880 stipule en effet que :

« Si l'épreuve (non décennale) exige la démolition du massif du fourneau, ou l'enlèvement de l'enveloppe de la chaudière, et un chômage plus ou moins prolongé, cette épreuve pourra ne pas être exigée, lorsque des renseignements authentiques sur l'époque et les résultats de la dernière visite, intérieure et extérieure, constitueront une présomption suffisante en faveur du bon état de la chaudière. Pourront être notamment considérés comme renseignements probants les certificats délivrés aux membres des associa-

tions de propriétaires d'appareils à vapeur, par celles de ces associations que le ministre aura désignées. »

La circulaire ministérielle du 21 juillet 1880, accompagnant l'envoi aux préfets du décret précité, renferme en outre le passage suivant [1] :

Depuis plusieurs années, des associations de propriétaires d'appareils à vapeur se sont formées sur divers points du territoire, pour se procurer une surveillance efficace au point de vue de la sécurité et de l'économie; il convient d'encourager cette tendance salutaire, et d'appeler dans une certaine mesure les institutions de ce genre à prêter leur concours à l'Administration. Dès maintenant, il y a lieu de prendre acte du nouvel état de choses, et d'en constater l'existence sous la forme d'une obligation de visites faites à la diligence des industriels, ainsi que d'une dispense d'épreuve toutes les fois que les résultats de cette inspection complète constitueront une présomption du bon état du générateur.

Aussi l'article 36 [2] en fait-il, non pas une simple recommandation, mais bien une obligation, et l'article 3 autorise à ne pas procéder au renouvellement de l'épreuve, lorsque les résultats d'une pareille visite établiront d'une manière positive que l'appareil est en bon état. Les ingénieurs des mines doivent porter une attention particulière sur ce point, et faire en sorte que la pratique de ces visites soit, partout, fidèlement suivie. Ils devront se renseigner sur les visites effectuées, et se faire représenter les certificats qui auront dû être délivrés à la suite de chacune d'elles. Si ces visites ne sont pas faites assez fréquemment, ou si l'ingénieur a des motifs de croire qu'elles ne sont pas faites sérieusement et utilement, en un mot, si l'appareil ne paraît pas être soumis, par celui qui en fait usage, à une surveillance suffisante, l'ingénieur devra, si les conditions dans lesquelles fonctionne la chaudière laisse des doutes sur son bon état, user des pouvoirs que donne l'article 3, et provoquer sans hésitation le renouvellement de l'épreuve.

Dans le cas où, par suite de contestation de la part de l'intéressé, la question serait portée devant vous, vous pourrez au besoin me transmettre d'urgence le dossier de l'affaire, afin que je le communique à la Commission centrale des machines à vapeur.

Lorsqu'une association de propriétaires voudra faire profiter ses membres, dans votre département, des facilités prévues par le décret, elle devra vous en faire la demande ; vous consulterez les ingénieurs des mines, et vous me transmettrez cette demande avec le rapport de ces fonctionnaires et votre avis personnel. Après avoir pris l'avis de la Commission centrale des machines à vapeur, je vous ferai connaître la suite dont cette affaire me paraît susceptible, et les relations qui pourront s'établir, en conséquence, entre ces associations et l'Administration.

En principe, et sous réserve des cas spéciaux qui pourraient se présenter, il me paraît que le rôle principal, vis-à-vis de l'Administration, des sociétés qui

[1] *Annales des mines*, 7e série, t. XVIII, partie administrative, p. 257.
[2] Du décret du 30 avril 1880.

seront agréées par elle, devra être de faire la preuve, par leurs certificats, que les visites intérieures et extérieures prescrites par l'article 36 sont bien et dûment faites, et par suite, de conférer, le cas échéant, aux appareils ainsi surveillés, la dispense du renouvellement d'épreuve stipulée par l'article 3.

Les mêmes considérations s'appliquent à la mise à exécution immédiate de la règle prescrivant l'épreuve décennale. Un très grand nombre de chaudières doivent, dès aujourd'hui, être éprouvées de nouveau; comme il n'est pas possible de tout entreprendre à la fois, il est juste de commencer par celles dont la dernière épreuve est la plus ancienne, mais il est en même temps prudent et non moins juste d'éprouver toutes les chaudières non visitées, avant celles munies de bons certificats de visites récentes, quand même la date de la dernière épreuve de celles-ci serait antérieure à celle des autres.

Il va de soi que la surveillance officieuse ainsi exercée ne dispense nullement les ingénieurs des mines d'exercer la surveillance officielle. Il convient d'ailleurs qu'ils se rendent compte par eux-mêmes de la façon dont fonctionnent ces associations, et sachent le degré de confiance que mérite leur intervention.

Dans les régions où se trouveraient des associations présentant toute garantie, l'attention des ingénieurs devra naturellement se porter de préférence sur les appareils non surveillés officieusement.

Pour faciliter les rapports qui doivent s'établir entre les associations et les ingénieurs des mines, j'ai l'intention de demander à celles qui réclameraient le bénéfice de l'article 3 du décret, d'adresser directement aux ingénieurs :

1° Chaque année, la liste générale des membres;

2° Tous les mois, la liste des mutations;

3° Tous les six mois, la liste des générateurs visités intérieurement et extérieurement, avec toute facilité pour les ingénieurs des mines de s'assurer de l'exactitude de ces documents, soit au siège des associations, soit auprès des industriels, qui devront, à toute demande des ingénieurs, représenter les procès-verbaux qui leur sont adressés à la suite de chaque visite.

Les visites d'appareils à vapeur existant en dehors des associations peuvent être faites par toute personne compétente, c'est-à-dire ayant les connaissances et l'expérience nécessaires.

Toutes les fois que ces visites ne seront pas faites par les agents d'une association agréée par l'administration, lorsque notamment elles seront faites par les propres agents des propriétaires, les ingénieurs des mines devront se préoccuper de la valeur qui peut être attribuée aux certificats de visite.

S'il y a lieu, ils attireront sur ce point l'attention des intéressés, et en tiendront tel compte qu'ils estimeront devoir le faire dans l'application, le cas échéant, dans l'application des dispositions prévues par l'article 3.

Toute épreuve d'un appareil neuf ou tout renouvellement d'épreuve doit, outre l'inscription sur des registres tenus au bureau de l'ingénieur des mines, être constatée par un procès-verbal délivré par l'ingénieur à l'intéressé.

L'épreuve et le renouvellement de l'épreuve étant les seules mesures dont puisse disposer l'Administration pour vérifier la solidité des appareils, il importe que cette opération soit toujours faite avec la plus grande attention. Il faut s'assurer, non seulement que l'appareil reste étanche, mais encore, et s'il y a lieu

par des mesures directes, qu'il ne subit aucune déformation permanente appréciable. Aussi, vous remarquerez que le paragraphe 3 de l'article 4 du décret veut que ce soit toujours sous la direction de l'ingénieur, et, partant, sous sa responsabilité, que l'opération ait lieu....

La circulaire ministérielle du 23 août 1887 renferme également les passages suivants [1] :

L'épreuve est exigible après réparation notable ou chômage prolongé; mais elle peut être remplacée par des renseignements authentiques constituant une présomption suffisante en faveur du bon état de la chaudière. Les certificats délivrés par les associations de propriétaires d'appareils à vapeur autorisées peuvent être considérés comme renseignements probants....

Les relations du service des mines avec les agents des associations de propriétaires d'appareils à vapeur autorisées donnent également lieu à diverses observations. Les termes du paragraphe 5 de l'article 3 précité permettent de considérer les certificats délivrés par ces associations comme renseignements probants, constituant une présomption suffisante en faveur du bon état de la chaudière et pouvant, à l'occasion, permettre de dispenser les industriels d'une épreuve autre que l'épreuve décennale.

Plusieurs associations délèguent un de leurs agents pour assister à l'épreuve règlementaire, avec mission de parcourir les carneaux et d'éviter, autant que possible, une démolition complète de la maçonnerie, même en cas d'épreuve décennale. En outre, cet agent passe une visite intérieure après l'épreuve, et cette visite fait l'objet d'un certificat spécial.

Cette manière de procéder, d'ailleurs toujours facultative et acceptée à titre de tolérance spéciale à chaque cas, n'a rien de contraire à l'esprit du règlement et paraît atteindre, en général, le but que se propose l'administration de sauvegarder efficacement la sûreté publique.

On ne saurait même trop recommander aux industriels de ne pas se fier exclusivement aux résultats de l'épreuve hydraulique, et de la visite extérieure qui l'accompagne : la visite intérieure des générateurs, d'ailleurs exigée par l'article 36 du décret du 30 avril 1880 à des intervalles suffisamment rapprochés, permet parfois de constater des avaries dangereuses qui n'ont pas été révélées lors de l'épreuve hydraulique et qui, cependant, nécessitent la réparation ou le remplacement des appareils.

[1] *Annales des mines*, 8e série, t. XII, partie administrative, p. 271.

CHAPITRE LXIII

APPAREILS DE SURETÉ

§ 1

CLAPET DE RETENUE D'ALIMENTATION

1194 — *Généralités.* — Les décrets réglementaires exigent la présence sur le générateur de divers *appareils de sûreté*, à savoir, dans le cas le plus étendu, et sauf des réductions plus ou moins particulières : un clapet de retenue d'alimentation ([1]), un clapet obturateur de vapeur ([2]), deux indicateurs de niveau ([3]), un manomètre ([4]), deux soupapes de sûreté ([5]).

Il est loisible à chaque industriel d'ajouter à cet ensemble, sous sa responsabilité, les appareils qui lui paraissent utiles comme supplément de sécurité, par exemple des sifflets d'alarme, des chevilles fusibles ([6]), etc. Mais il est de règle que les indications fournies par ces derniers doivent concorder avec celles des appareils réglementaires, quand elles sont de même nature.

1195 — *Clapet de retenue d'alimentation.* — Nous avons vu (n° 1158) que l'eau renfermée sous pression dans une chaudière constitue un réservoir formidable d'énergie, capable d'exercer les

([1]) Décret du 30 octobre 1880, article 8.
([2]) Décrets du 30 octobre 1880, article 9, et du 20 juin 1886, article 1er.
([3]) Décret du 30 octobre 1880, article 11.
([4]) *Id.*, article 7.
([5]) *Id.*, article 6.
([6]) Voy. ci-après, § 6.

plus grands ravages. De plus, en dehors de ses effets mécaniques en cas de rupture, elle agit d'une manière fatale sur les hommes qu'elle atteint, en leur infligeant des brûlures trop souvent mortelles [1]. Lorsque c'est le corps de chaudière lui-même qui fait explosion, rien ne saurait évidemment soustraire le voisinage à ses effets destructeurs. On a cherché du moins à les prévenir, quand la rupture a lieu en quelque point du système de l'alimentation.

Le décret du 30 avril 1880 a, dans ce but, fait par son article 8 une obligation de placer, au point d'insertion du tuyau d'alimentation, un appareil de retenue fonctionnant automatiquement [2]. De cette manière, si la conduite se trouve rompue, le contenu de la chaudière tendant à s'échapper par cette ouverture, plaque immédiatement le clapet sur son siège (fig. 720), et se trouve par là isolé de l'extérieur.

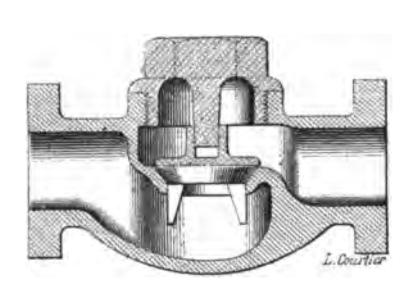


Fig. 720. — Clapet de retenue d'alimentation. (Coupe verticale).

L'utilité de cet organe devient encore plus grande lorsqu'il s'agit de batteries de chaudières. Autrefois tous les générateurs se vidaient entièrement par suite de l'éventrement d'un seul d'entre eux, en exerçant ainsi d'inoubliables ravages (n° 1153). Aujourd'hui le générateur avarié répand seul son contenu dans l'atmosphère, chacun des autres restant clos par son clapet de retenue.

Ce dernier ne sert pas d'ailleurs que pour le cas d'un désastre.

[1] Un mètre cube d'eau, supposée à la pression effective de 5 kilogrammes, est capable de jeter dans l'atmosphère 170 mètres cubes de vapeur. Si l'on prend comme exemple une batterie de 6 chaudières contenant chacune 10 mètres cubes d'eau, sans clapets de retenue, elle répandrait plus de 10 000 mètres cubes de vapeur, c'est-à-dire de quoi remplir intégralement un hémisphère de 17 mètres de rayon tout autour du point d'émergence.

[2] Walther-Meunier. *Congrès des Ingénieurs en chef des Associations de Propriétaires d'appareils à vapeur*, Lyon, 20 octobre 1880. — *Bulletin de la Société d'encouragement*, 3e série, t. XII, p. 250. — *Comptes rendus mensuels de la Société de l'Industrie minérale de Saint-Étienne*, 1881, p. 8.

Clapets de retenue d'alimentation : Lethuillier-Pinel. Armengaud. *Publication industrielle*, 2e série, t. VIII, p. 437. — Muller et Rogér. Ser. *Physique industrielle*, t. II, p. 193.

Dans le service normal, il pourrait arriver que des jeux de pression vinssent exercer sur l'une des chaudières une sorte d'aspiration, provoquant un retour du liquide dans la conduite d'alimentation, et l'abaissement du plan d'eau, en exposant les tôles à rougir. Ce danger disparaît avec l'emploi du nouvel organe.

1196 — Le clapet de retenue doit avoir une faible levée et un guidage assuré. Il est rare qu'il soit assez étanche pour pouvoir servir de fermeture normale. Mais on lui adjoint à cet égard un robinet d'arrêt manœuvré à la main.

La situation précise à donner au clapet résulte des termes mêmes du décret. Le but de cette prescription est de ne pas ajouter, aux chances de rupture du générateur lui-même, celles du bout de tuyau que l'on viendrait à laisser entre lui et le clapet. Cependant on tolère l'interposition d'un robinet, permettant de visiter ce dernier, même sous pression.

La question s'est posée, à l'occasion des réchauffeurs d'alimentation, de savoir s'ils doivent être considérés à ce point de vue comme faisant, ou non, partie de la chaudière. Mais la réponse ne comporte pas d'hésitation, et le clapet doit être installé au delà du réchauffeur, à l'insertion sur la chaudière même, ou individuellement sur chacun des générateurs qui seraient desservis par un même réchauffeur. Rien n'empêche d'ailleurs les constructeurs qui sy trouveraient disposés, d'en placer un second entre la pompe et le réchauffeur.

On pourrait de même en mettre dans les cuissards, afin que si un bouilleur se crève, son contenu se répande seul au dehors, sans entraîner avec lui celui du corps cylindrique. Cependant on ne devra pas perdre de vue le danger de la formation de chambres de vapeur sous ces organes, ainsi que celui de l'entartrement.

On s'est également demandé si le clapet de refoulement de la pompe alimentaire peut être considéré comme satisfaisant à la prescription de l'article 8. Ce ne peut être évidemment qu'à la condition qu'il se trouve placé précisément au point d'insertion du tuyau d'alimentation.

§ 2

CLAPET OBTURATEUR DE VAPEUR

1197 — *Généralités.* — Il s'attache à la segmentation des atmosphères de vapeur d'une batterie de chaudières, à l'aide de *clapets obturateurs de vapeur* (¹), un intérêt du même genre qu'à l'isolement de leurs bains liquides respectifs au moyen de clapets de retenue d'alimentation (²). L'article 1er du décret du 29 juin 1886 en a fait une obligation dans certains cas (n° 1187). Un très grand nombre de dispositifs différents ont été proposés à cet égard (³).

On doit, dans la construction des clapets obturateurs, s'attacher à remplir plusieurs conditions.

Il est nécessaire de concilier une fermeture nette et prompte, en cas de rupture, avec un degré suffisant de paresse à céder sous des oscillations d'importance médiocre, inévitables dans toute marche normale.

(¹) Hirsch. Rapport sur les clapets obturateurs de vapeur. *Bulletin de la Société d'encouragement*, 4e série, t. II, p. 257. — Dubiau. Clapets automatiques d'arrêt de vapeur. *Société scientifique industrielle de Marseille*, 15 décembre 1887. — *Bulletin de l'Association parisienne des Propriétaires d'appareils à vapeur*, 1884, p. 61. — *Comptes rendus mensuels des séances de la Société de l'industrie minérale de Saint-Étienne*, 1887, p. 7, 32, 41, 48, 121. — Michel Lévy. *Annales des mines*, novembre-décembre 1886.

(²) L'importance maxima des groupes d'isolement a été déterminée par l'article 1er du décret du 29 juin 1886 (n° 1 187).

(³) Clapets obturateurs de vapeur : Artige. *Revue industrielle*, 5 février 1885, p. 55. — Boivin (*Portefeuille économique des machines*, 3e série, t. XII, p. 11. — *Chronique industrielle*, 14 novembre 1886, p. 545). — Broyet et Delord. *Écho des mines et de la métallurgie*, 1887. — Buisson. *Comptes rendus mensuels des séances de la Société de l'industrie minérale de Saint-Étienne*, 1886, p. 264. — Farcot (*Revue industrielle*, 13 mai 1886, p. 196. — *Bulletin de l'Association parisienne des Propriétaires d'appareils à vapeur*, 1884, p. 62). — Fleutot. Hirsch. *Bulletin de la Société d'encouragement*, 4e série, t. III, p. 403. — Franck et Mesnard. *Ibidem*. 4e série, t. III, p. 264. — Fryer. Ser. *Physique industrielle*, t. II, p. 200. — Jeantin. *Bulletin de la Société industrielle du Nord de la France*, 14e année, p. 64. — Lethuillier-Pinel (*Portefeuille économique des machines*, 3e série, t. XII, p. 10. — *Les inventions brevetées*, octobre 1886. — *Revue industrielle*, 14 avril 1887, p. 145). — Lozai. *Ibidem*, 20 janvier 1887, p. 25. — Olivier. *Comptes rendus mensuels des séances de la Société de l'industrie minérale de Saint-Étienne*, 1886, p. 251. — Pasquier (*Bulletin de la Société d'encouragement*, 4e série, t. I, p. 333. — *Portefeuille économique des machines*, 3e série, t. XII, p. 154). — Risler. *Génie civil*, 10 novembre 1888, p. 29. — Schœffer et Budenberg. *Revue industrielle*, 3 février 1887, p. 43.

Il est nécessaire d'éviter les étranglements, en raison des pertes de charge qui en seraient la conséquence.

Il convient de soustraire ces appareils à l'intervention des chauffeurs, qui pourraient être tentés d'en paralyser l'effet; et cependant il est bon qu'on en puisse contrôler au besoin le fonctionnement, et se trouver informé par quelque signe extérieur de la position occupée par le clapet.

Celui-ci doit se rouvrir nettement de lui-même, lorsque la cause adventice de fermeture a disparu. Il importe par suite de surveiller les causes d'oxydation, d'entartrement, etc., et d'épargner autant que possible au mécanisme leur influence.

Il n'y a pas lieu d'ailleurs d'ajouter à toutes ces exigences celle d'une fermeture absolument étanche, comme cela est nécessaire par exemple pour la prise de vapeur. Un certain jeu du clapet obturateur, n'ajouterait pas sensiblement aux conséquences d'une explosion.

On peut répartir ces organes en trois classes, suivant qu'ils fonctionnent de dedans en dehors, de dehors en dedans, ou dans les deux sens. Les appareils qui appartiennent à cette dernière catégorie s'installent ordinairement sur la conduite générale; les autres sur les branchements qui la rattachent à chacun des générateurs individuellement.

Passons en revue les propriétés de ces divers modes de fonctionnement.

1198 — *Clapets Hirsch, Belleville, Labeyrie.* — J'envisagerai d'abord un clapet susceptible de jouer de dedans en dehors, c'est-à-dire vers l'aval du courant normal. Le système de M. Hirsch (1) appartient à cette catégorie. La figure 721 en montre le mode d'action.

Si la conduite vient à se rompre, tous les clapets s'appliquent sur leurs sièges, en raison de l'entraînement subit que communique à la vapeur la dépression ainsi produite. Le désastre est donc immédiatement localisé. Si c'est au contraire l'une des chaudières qui

(1) *Portefeuille économique des machines*, 1885, p. 35. — *Revue industrielle*, 1885, p. 55. — *Bulletin de l'Association parisienne des Propriétaires d'appareils à vapeur*, t. II, p. 60, 1884.

crève, le même phénomène se produit dans tous les autres branchements. Quant à celui qui est adjacent au générateur avarié, il ne saurait être d'aucun secours, et le collecteur se videra en même temps que cette chaudière.

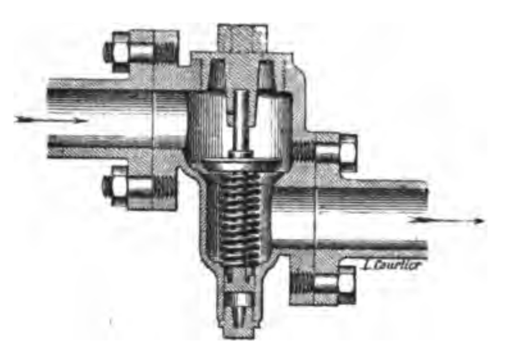


Fig. 721. — Clapet obturateur de vapeur Hirsch. (Coupe verticale).

Pour les appareils de ce genre, un ressort, ou un poids d'une importance modérée sont nécessaires, pour soutenir l'obturateur contre la pression normale exercée par le courant, et ses inégalités inévitables, sans quoi celui-ci se plaquerait à chaque instant, en rendant impossible le fonctionnement du système. Ces agents servent en outre à ramener le clapet en place, lorsque la cause qui l'avait appliqué sur son siège a cessé d'intervenir.

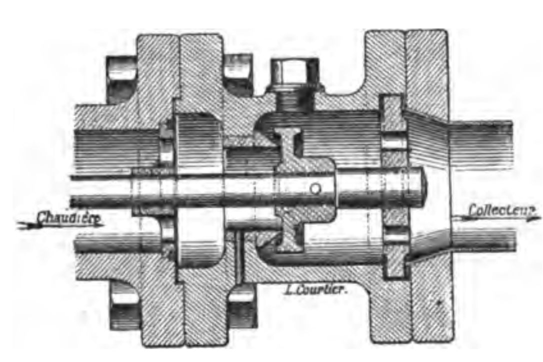


Fig. 722. — Clapet obturateur de vapeur Belleville. (Coupe verticale).

1199 — Soit en second lieu une soupape jouant de dehors en dedans, c'est-à-dire vers l'amont. Le système Belleville ([1]) en fournit un exemple (fig. 722).

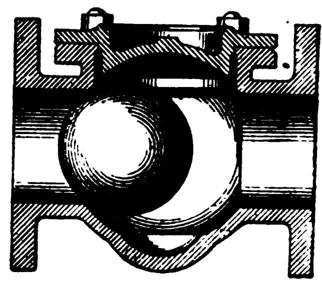
Si la chaudière correspondante se déchire, l'obturateur fonctionne immédiatement; ce récipient se vide, mais non le reste de la batterie. Il subsiste cependant la chance que la violence d'une explosion, qui sera en général très voisine, ne fausse le jeu de cet organe

([1]) *Revue industrielle*, 17 décembre 1885, p. 506. — *Bulletin de l'Association parisienne des Propriétaires d'appareils à vapeur*, 1884, p. 61.

délicat. D'autre part, si c'est la conduite générale qui vient à crever, tous les clapets resteront en place, et la catastrophe suivra son cours dans toute son étendue.

Ce système est donc *a priori* moins parfait que le précédent. On peut, à la vérité, invoquer en sa faveur la simplification résultant de la suppression du ressort et du contrepoids, qui n'ont plus ici de raison d'être. Ce type semble en outre plus propre à la réalisation des desiderata généraux que nous énoncerons plus loin. Mais il sera sans doute permis de penser qu'au point de vue général on ne saurait trouver là une compensation suffisante. Toutefois ce sera surtout une question d'espèce, d'après l'appréciation des circonstances spéciales à chaque cas (¹).

1200 — Considérons enfin des appareils capables de jouer dans



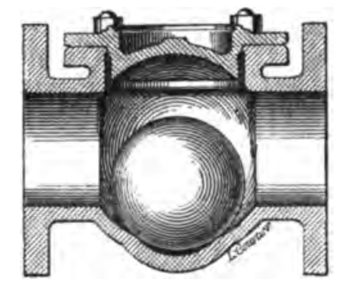


Fig. 723 et 724. — Clapet obturateur de vapeur Labeyrie (coupes verticales).

les deux sens. Je citerai comme exemple (fig. 723, 724) le clapet Labeyrie (²).

Nous les supposerons établis en divers points de la conduite. Ils la sectionnent en tronçons, dont chacun correspond à un branchement et à l'un des générateurs. Si une rupture se produit dans cette chaudière, dans le branchement, ou dans le tronçon

(¹) Circulaire ministérielle du 11 avril 1891.

(²) *Revue industrielle*, 2 décembre 1886, p. 485. — *Bulletin de la Société d'encouragement*, mai 1887, p. 265. — *Bulletin technologique de la Société des anciens Élèves des Écoles d'arts et métiers*, juin 1889.

Ce système peut invoquer en sa faveur sa grande simplicité, l'absence de ressorts et de contrepoids. Enfermé dans une boîte scellée, le boulet est placé hors de l'atteinte du chauffeur, sauf pour les visites réglementaires

lui-même, les deux clapets qui limitent ce dernier se plaqueront suivant deux sens contraires, de manière à isoler ce segment, et à localiser l'expansion.

Quelquefois le diamètre considérable du collecteur s'oppose à ce mode d'installation. On peut, en ce cas, placer les clapets à double effet sur les branchements eux-mêmes.

1201 — *Clapets Carette, Vaultier, Pile.* — Indépendamment des exemples que nous venons de rattacher directement à la définition des trois catégories d'obturateurs, je citerai encore les suivants.

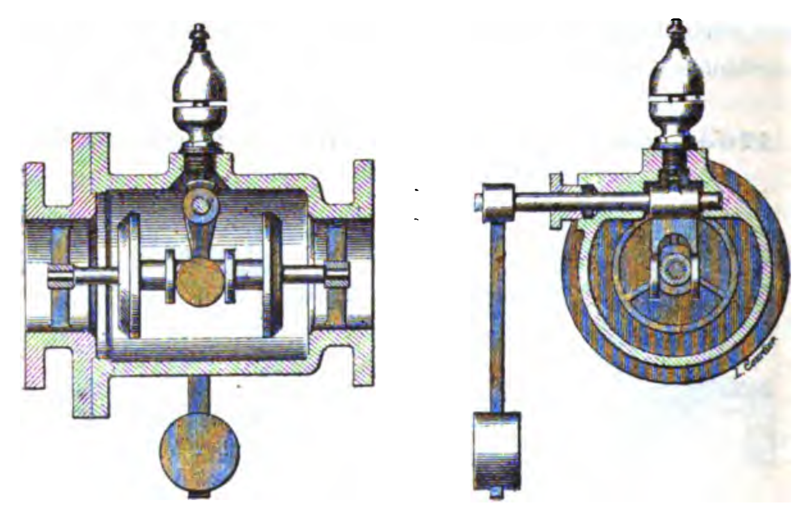


Fig. 725 et 726. — Clapet obturateur de vapeur Carette (coupes longitudinale et transversale).

On peut rapporter à la troisième classe le *type-pendule*, dont le jeu symétrique se prête également au fonctionnement dans les deux sens.

M. Carette emploie l'oscillation circulaire du pendule (fig. 725, 726) à produire une translation rectiligne de l'obturateur [1].

[1] *Bulletin de la Société d'encouragement*, 3e série, t. II, p, 257. — *Écho des mines et de la métallurgie*, 1887. — *Les inventions brevetées*, 1887, p. 53. — Ser. *Physique industrielle*, t. II, p. 199. — *Revue industrielle*, 8 décembre 1887, p. 483.

L'influence de la gravité maintient le passage ouvert en temps ordinaire. La valeur que l'on donnera au poids du pendule permettra de régler l'action en vue de telle ou telle vitesse de courant. L'index extérieur renseigne sur la position du clapet, que l'on

M. Vaultier l'utilise directement (fig. 727, 728) pour plaquer le clapet contre des sièges inclinés ([1]).

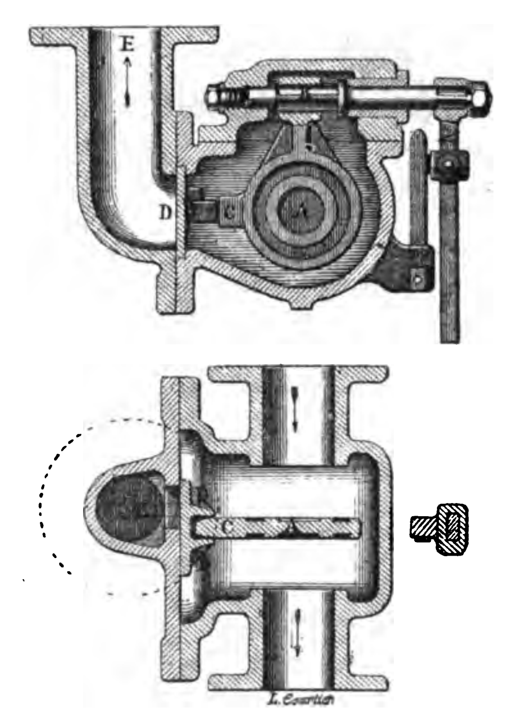


Fig. 727 et 728. — Clapet obturateur de vapeur Vaultier (coupe et plan).

Nous rangerons dans le premier type l'obturateur Pile (fig. 729).

peut en outre munir d'un sifflet, pour avertir des contacts accidentels qui risqueraient de faire monter la pression. En manœuvrant à la main cet index de temps à autre, on peut prévenir l'entartrement,

([1]) Le clapet A oscille autour de l'axe B. Des rondelles de plomb sont employées pour amortir le choc, et garantir l'étanchéité. En outre un bossage C agit (à l'aide d'un galet pour diminuer le frottement) sur une plaque D, recouvrant un échappement à l'air libre E. La position de ce dernier est dissymétrique, ce qui entraîne les conséquences suivantes.

Si le clapet bat du côté de la chaudière, D ne démasque pas E. Par conséquent, en cas de non-pression accidentelle, le générateur n'achèvera pas de se vider, et rétablira progressivement sa tension, en laissant les autres chaudières fournir aux besoins des moteurs.

Lorsque au contraire A vient se plaquer du côté du collecteur de vapeur, le conduit E se trouve ouvert. Si donc la pression s'élève trop rapidement, elle se dégorge de cette manière. De même, si c'est le collecteur général qui se trouve fermé, la vapeur, au lieu d'envahir l'atelier, se déversera au dehors.

L'inventeur, sans se refuser le concours de l'entraînement produit par l'accélération que détermine dans le courant de vapeur une

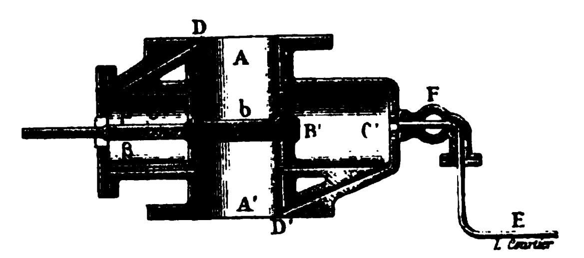


Fig. 7.9. — Clapet obturateur de vapeur Pile (figure schématique).

rupture des enveloppes, a cherché à se procurer en même temps la garantie d'une action statique(1).

§ 3

INDICATEUR DE NIVEAU

1202 — *Généralités.* — Nous avons vu (n° 1178) quelle extrême importance s'attache à ce que le chauffeur soit à chaque instant exactement renseigné sur la position du niveau de l'eau, afin de ne jamais le laisser s'abaisser au-dessous de la ligne des carneaux.

(1) *Bulletin de la Société d'encouragement*, 4e série, t. II, p. 304.

Sur le trajet AA′ de la vapeur, se trouve interposé un double piston BB′, dont les deux parties sont unies par la tige *b*, en même temps que l'une d'elles B se prolonge sous la forme d'un cylindre creux β. Cet ensemble peut se transporter de l'une à l'autre des chambres C et C′. Ces deux enceintes communiquent respectivement, par les canaux D et D′, avec les conduites d'amont et d'aval A et A′. On doit surveiller attentivement ces pertuis, au point de vue de l'entartrement.

En temps ordinaire, le passage reste libre entre A et A′, la tige C n'obstruant la voie que dans une proportion insignifiante. Mais si une accélération vient à se produire, elle a pour effet de refouler par le tube D dans la chambre C, et d'aspirer par D′ dans l'espace C′. De là une différence de pression qui porte les pistons vers la droite, et met le cylindre β en travers du passage AA′, qu'il intercepte.

Si l'accélération reste insuffisante, le même effet se produira néanmoins par l'influence du tube E, qui fait communiquer la prise de vapeur AA′ avec toutes les autres chaudières. Une dépression brusque s'y produisant par l'éventrement de l'une de ces dernières, ou de la rupture du tube E lui-même, la différence de tension entre C et C′ portera encore l'organe mobile dans le même sens. Un robinet F sert à isoler l'appareil, quand cela devient nécessaire.

L'article 11 du décret du 30 avril 1880 exige à cet effet que chaque chaudière soit munie de deux *indicateurs de niveau* (1), indépendants l'un de l'autre, et placés en vue de l'ouvrier chargé de l'alimentation. L'un de ces appareils doit être nécessairement un tube de verre, sur lequel une ligne très apparente marque, *à six centimètres au-dessus de la ligne des carneaux*, la position-limite au-dessous de laquelle l'eau ne doit pas s'abaisser, d'après les termes de l'article 10.

1203 — *Tube de cristal.* — Le *tube de cristal* (fig. 730, 731) est en effet, de tous les indicateurs de niveau (2), le plus simple et

(1) Obturateur automatique de niveau brisé. Hanet Cléry. *Annales des mines*, 7e série, t. IV, p. 25. — Indicateur de niveau à distance. *Bulletin de la Société d'encouragement*, 3e série, t. XII, p. 471. — Dieudonné. Indication automatique à distance de niveau et de pression. *Revue universelle des mines et de la métallurgie*, 2e série, t. XVI, p. 167. — Indicateur de niveau pour chaudière verticale. *Neuvième Congrès des Ingénieurs en chef des associations de Propriétaires d'appareils à vapeur*, 1886, p. 77. — Chevalet. Nettoyage en marche des tubes de niveau. *Annales industrielles*, 6 mars 1890, p. 424. — Avertisseur électrique de niveau. *La Lumière électrique*, t. XI, p. 297. — Sifflet d'alarme. *Comptes rendus mensuels des séances de la Société de l'industrie minérale de Saint-Étienne*, 1872, p. 77. — Sifflet avertisseur. *Annales industrielles*, 1884, t. II, p. 18.

(2) Indicateurs de niveau d'eau : Agnès. *Annales industrielles*, 1885, t. I, p. 350. — Amouroux. *La Nature*, 14 octobre 1886, p. 172. — Ashley. *American machinist*, 29 janvier 1891, p. 11. — Barbey. *La lumière électrique*, 1882, p. 220. — Barr et Mac Whirter. *Ibidem*, t. XXXI, p. 389. — Bateman. Richard. *La chaudière locomotive*, p. 298. — Baudouin. *La métallurgie*, 26 avril 1891, p. 1326. — Bayley. Richard. *La chaudière locomotive*, p. 297. — Bergmarsch. *Ibidem*, p. 298. — Blache. Rapport Lorieux. *Annales des mines*, 1852. — Bourdon (*Bulletin de la Société d'encouragement*, 1845, p. 295. — Armengaud. *Publication industrielle*, juillet 1891, p. 61). — Brown. *Scientific american*, 23 février 1884, p. 125. — Burgermeister. Richard. *La chaudière locomotive*, p. 295. — Carette. Ser. *Physique industrielle*, t. II, p. 152. — Chaudré (*Annales des mines*, 7e série, t. IX, p. 78. — *Revue technique de l'Exposition de* 1889, 6e partie, t. I, p. 333). — Chaussenot. Péclet. *Traité de la chaleur*, t. II, p. 36. — Crook. Richard. *La chaudière locomotive*, p. 296. — Cumming. *American journal of railway appliances*, 1er septembre 1884, p. 156. — Dagaud. Richard. *La chaudière locomotive*, p. 295. — Damourette. Armengaud. 1878, p. 448. — Desbordes. Rapport Lorieux. *Annales des mines*, 1852. — Deschamps. Richard. *La chaudière locomotive*, p. 293. — Dewrance, *Ibidem*, p. 300. — Dewurst. *Chronique industrielle*, 4 juin 1886, p. 309. — Dietz. *Annales des mines*, 1852, t. I, p. 120. — Dixon. Richard. *La chaudière locomotive*, p. 301. — Dreyer. *Ibidem*, p. 297. — Dupuch (*Annales des mines*, 7e série, t. IV, p. 25. — *Revue industrielle*, 1880, p. 295). — Ellis. Richard. *La chaudière locomotive*, p. 298. — Fairbairn. *Ibidem*, p. 301. — Farcot. *Annales des mines*, 1842, t. I, p. 425. — Ferraris. *La lumière électrique*, t. XII, p. 463, hydrométrographe. — Field. *Engineering*, 26 août 1881, p. 210. — Georges. Armengaud, t. XXIV, p. 450. — Gerkine et Ledent. *Revue industrielle*, 29 septembre 1880, p. 384. — Ghegan

le plus complet. La fragilité proverbiale du verre n'implique pas nécessairement un manque de résistance statique. Son allongement élastique, souvent méconnu, est parfois supérieur à celui du cuivre. Sa fragilité, pour l'emploi qui nous occupe en ce moment, provient surtout de la mauvaise conductibilité, qui laisse dans un fâcheux

(*La lumière électrique*, t. XXIII, p. 142; 30 octobre 1886, p. 231. — *The electrical Engineer*, 3 décembre 1890, p. 619). — Goddard. Richard. *La chaudière locomotive*, p. 293. — Guibert. *Comptes rendus mensuels des séances de la Société de l'industrie minérale de Saint-Étienne*, avril 1877, p. 18. — Guilbert Martin. *Portefeuille économique des machines*, 3e série, t. X, p. 188. — Haller. *La lumière électrique*, t. XXXIV, p. 481. — Hamel. *Publication industrielle*, 24e volume. — Hawthorne. *American machinist*, 30 juillet 1891, p. 4. — Heurtier. Richard. *La chaudière locomotive*, p. 297. — Horsin Déon. Armengaud. Juillet 1891, p. 63. — Jarraut. *Journal des ouvriers inventeurs*, 5 décembre 1891, p. 4. — Jenkins. *The railroad Gazette*, 6 février 1891, p. 91. — Johnson. Richard. *La chaudière locomotive*, p. 295. — Julius Sax. *Annales industrielles*, 4 novembre 1888, p. 580. — Kemiou. *Comptes rendus mensuels des séances de la Société de l'industrie minérale de Saint-Étienne*, mars 1877, p. 15. — Kilpoyle. *Scientific American*, 11 janvier 1890, p. 20. — Ladry. *Génie civil*, 1881, p. 275. — Lefèvre et Renaux (*La Nature*, 8 mars 1884, p. 237. — *Bulletin de la Société industrielle du Nord de la France*, 14e année, p. 29). — Lempert. *Bulletin de la Société d'encouragement*, 3e série, t. XII, p. 471. — Lépine. *Génie civil*, 17 mai 1890, p. 47. — Leroy. *Revue technique de l'Exposition de* 1889, 6e partie, t. I, p. 332. — Macabiès. *Comptes rendus mensuels des séances de la Société de l'industrie minérale de Saint-Étienne*, 1879, p. 148. — Mac-Farlane. *Scientific American*, 6 juin 1891, p. 355. — Mac Keuner et Carley. *Ibidem*, 29 décembre 1883. — Macpherson. *Engineering*, 10 novembre 1871, p. 311. — Marshall et Mac Carter. *Scientific American*, 21 février 1891, p. 115. — May. *La lumière électrique*, t. XI, p. 212. — Morley. Richard. *La chaudière locomotive*, p. 296. — Meunier. Péclet. *Traité de la chaleur*, t. II, p. 29. — Morrison. *American machinist*, 29 octobre 1891, p. 11. — Moseley. *Chronique industrielle*, 31 juillet 1887, p. 354. — Murrie. *Publication industrielle*, juillet 1891, p. 63. — Nunn et Clough. Richard. *La chaudière locomotive*, p. 298. — Parker et Tupper. *Scientific American*, 4 février 1888, p. 66. — Perrotte (Hirsch. *Rapport sur l'Exposition de 1878*, p. 116. — *Septième Congrès des Ingénieurs en chef des associations de Propriétaires d'appareils à vapeur*, 1882, p. 72). — Raffard (*La métallurgie*, 1889, p. 10. — *Bulletin technologique de la Société des anciens Élèves des Écoles des Arts et Métiers*, mai 1889, p. 377). — Reichling. *La lumière électrique*, 24 juillet 1886, p. 177. — Reimann. Armengaud. Juillet 1891, p. 63. — [illegible]. *Bulletin de la Société industrielle de Mulhouse*, 1875, p. 328. — Robert Guérin. *La lumière électrique*, t. XIV, p. 229. — [illegible] (*Revue industrielle*, 12 février 1885, p. 65. — *La Nature*, 10 juin 1882, p. 26. — *L'Ingénieur, moniteur des brevetés*, 15 avril 1888, p. 74). — Schneider. Richard. *La chaudière locomotive*, p. 295. — Schwarzkopf. *La lumière électrique*, 20 septembre 1884, p. 451. — Siemens et Halske. *Ibidem*, t. XLIII, p. 123. — Sinclair. *American machinist*, 4 avril 1885, p. 5. — Slater. Richard. *La chaudière locomotive*, p. 296. — Spencer. *Chronique industrielle*, 24 février 1889, p. 103. — Stromdley. Richard. *La chaudière locomotive*, p. 298. — Strubbs. *Publication industrielle*, juillet 1891, p. 62. — Toulet. *Revue industrielle*, 2 avril 1884, p. 133. — *Universal American machinist*, 8 mai 1890, p. 11. — Vautier. *Annales industrielles*, 1884, t. I, p. 337. — Ward. Richard. *La chaudière locomotive*, p. 293. — Webb. *Ibidem*, p. 298. — Wickersham. *Scientific American*, 30 mai 1885, p. 338. — Wilson. Armengaud. *Publication industrielle*, juillet 1891, p. 61.

état de tension interne des verres mal refroidis [1]. Ce serait par suite une faute de chercher la solidité dans un excès d'épaisseur. La plus convenable est de 2 millimètres à $2^{mm},5$. C'est une autre erreur de proportionner, comme on est quelquefois tenté de le faire, le diamètre du tube à celui de la chaudière. Il vaudrait mieux faire l'inverse, à cause des conditions de résistance (n° 993). Le diamètre ne doit pas dépasser 16 à 22 millimètres. De son côté, la longueur n'excède pas 300 millimètres, afin de ne pas donner trop de prise aux dilatations. Des verres basiques à radicaux multiples, et en particulier au plomb, procurent le maximum deconductibilité avec le minimum de dilatation. Examinés dans leur tranche à la lumière polarisée, ils ne doivent pas fournir d'indices de trempe [2].

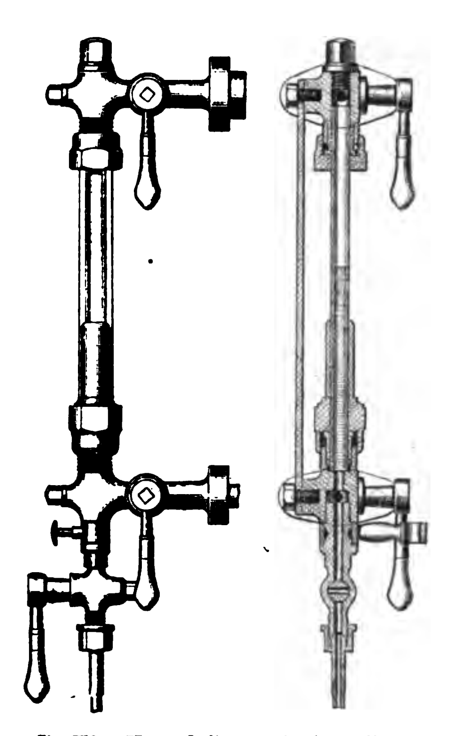


Fig. 730 et 731. — Indicateur de niveau d'eau. (Élévation et coupe verticale).

Le tube est pris à ses extrémités dans des presse-étoupes, avec interposition de matières élastiques, destinées à permettre la dilatation. Pour assurer la rigidité de l'ensemble, on rend les deux garnitures solidaires l'une de l'autre à l'aide d'une réglette, qui est parfois graduée. Un gros trait rouge sur fond blanc marque la ligne de foi qui est exigée par le règlement. Une partie du verre peut être émaillée pour rendre cette dernière plus visible. Pendant la nuit, on l'éclaire avec une lanterne.

[1] Les *larmes bataviques* en fournissent l'expression la plus excessive.

[2] Appert. Les tubes de niveau dans les chaudières à vapeur à haute pression. *Génie civil*, 30 mars 1880, p. 353.

Les ajutages sur lesquels se trouve assemblé le tube de verre, doivent être insérés en des points de la chaudière soustraits autant que possible à l'action des courants et de l'entartrement. Ces tubulures sont munies de robinets, permettant de les fermer en cas de rupture du tube. Il est bon de pouvoir effectuer cette manœuvre avec un levier assez long pour écarter le danger de brûlure, au milieu des jets de vapeur et d'eau bouillante qui s'échappent par cette issue. On emploie également à cet effet des boulets obturateurs, qui font, en pareil cas, l'office de clapets de retenue. Il faut toujours avoir à pied d'œuvre des tubes de rechange, avec tout ce qui est nécessaire à leur mise en place.

Pour supprimer l'agitation qui résulte de l'ébullition, et pour prévenir des invasions de boue, on interpose quelquefois un barillet, dans lequel ces effets s'amortissent. On a même employé une cloison percée de trous. Un purgeur placé à la partie inférieure permet de donner de petites chasses, afin de débarrasser l'appareil des obstructions.

1204 — *Indicateur Planche.* — La disposition du tube de verre présente une difficulté spéciale, quand il s'agit de chaudières verticales métallurgiques, dont le niveau se trouve reporté à une grande hauteur au-dessus du terre-plein où se tient habituellement le chauffeur. L'article 11 du décret réglementaire stipule qu'en ce cas le tube ordinaire est remplacé par un appareil disposé de manière à reporter, en vue de l'ouvrier chargé de l'alimentation, l'indication du niveau dans la chaudière.

Je citerai comme exemple l'appareil Planche[1]. Un long tube en U (fig. 732, 733, 734) renferme du mercure dans son coude inférieur en AB. Ses deux branches a, b sont remplies d'eau, l'une directement par le bain liquide, l'autre par la condensation de la vapeur résultant du contact de l'air extérieur. La dénivellation du métal, mesurée à l'aide d'une graduation, permet d'apprécier la position du niveau dans le générateur.

Appelons en effet Z cette dénivellation, z la distance de l'ajutage

(1) *Annales des mines*, 6e série, t. XVIII, p. 379. — Haton de la Goupillière. *Bulletin de l'Association scientifique de France*, t. IX, p. 202.

supérieur à la surface de l'eau, h la hauteur du même point fixe au-dessus du ménisque inférieur du mercure ; Π et ϖ les poids

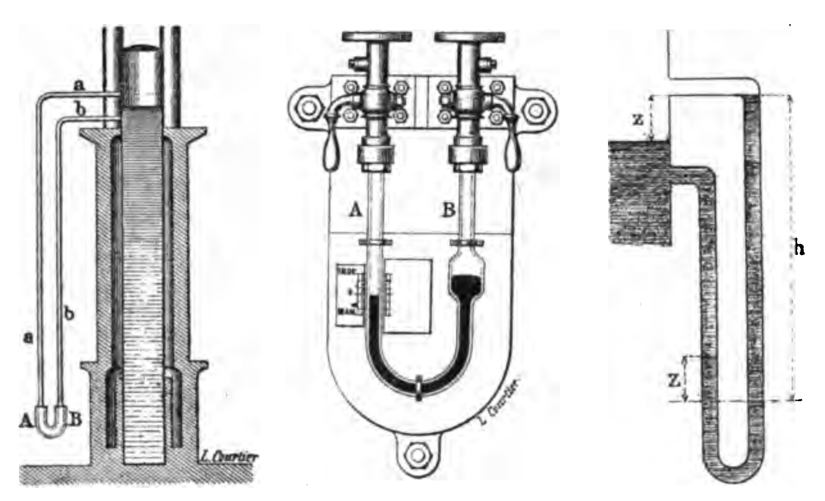


Fig. 732. Indicateur de niveau Planche. (Coupe verticale).

Fig. 733. Indicateur de niveau Planche. (Détail).

Fig. 734. Indicateur de niveau Planche. (Figure schématique).

spécifiques de ce métal et de l'eau. Nous aurons, en exprimant de deux manières différentes la pression sur ce ménisque, et représentant par p la tension de la vapeur :

$$p + \varpi h = p + \varpi (h - z - Z) + \Pi Z,$$

d'où l'on tire :

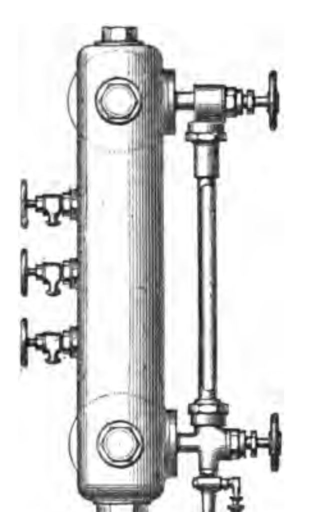
$$z = \left(\frac{\varpi}{\Pi} - 1\right) Z,$$

c'est-à-dire :

$$z = 12{,}6\, Z.$$

1205 — *Robinets de jauge.* — En dehors du tube de cristal, qui est rigoureusement réglementaire, le choix du second indicateur de niveau prescrit par le décret reste arbitraire. L'un des types les plus simples est connu sous le nom de *robinets de jauge.*

Ce système est formé de trois robinets étagés. Celui du haut doit toujours fournir de la vapeur quand on l'interroge; celui du bas, toujours de l'eau. Quant au robinet intermédiaire, il renseigne sur l'état des choses, suivant qu'il donne de l'eau ou de la vapeur. Il est vrai que ses indications présentent parfois quelque obscurité.



Fig, 735. — Clarinette. (Élévation).

Cet ensemble est monté, soit sur la chaudière même, soit sur une *clarinette* (fig. 735), sorte de dépendance qu'on lui rattache pour porter à la fois plusieurs appareils de sûreté, quand les dimensions du générateur ne permettent pas facilement d'y trouver la place nécessaire pour pratiquer autant de trous distincts. On ne saurait se dissimuler que ce dispositif tendrait à rendre illusoire l'indépendance des appareils que les règlements exigent en double, si on les installait tous les deux sur la clarinette.

1206 — *Indicateur magnétique Lethuillier-Pinel.* — L'*indicateur magnétique Lethuillier-Pinel* [1] évite la perforation de l'enveloppe de la chaudière. Un flotteur aimanté à talon monte ou descend le long d'une verticale (fig. 736). Ses pôles sont appliqués par un léger ressort contre une paroi de bronze. L'influence magnétique commande au dehors le mouvement d'une aiguille d'acier, le long d'une réglette graduée protégée par une glace.

On peut au besoin organiser l'appareil de telle sorte que, en arrivant à certaines positions extrêmes, supérieure et inférieure, le système ferme un circuit électrique, qui met en mouvement des sonneries avertisseuses.

[1] *Bulletin de la Société d'encouragement*, 1855, p. 3. — *Revue industrielle*, 1er septembre 1887, p. 83. — *La lumière électrique*, 20 septembre 1884, p. 450. — *Scientific american supplement*, 10 mars 1883, p. 5975.

1207 — *Indicateur d'alarme.* — Cette dernière disposition se rattache au principe des ***indicateurs d'alarme***, qui avertissent au moyen d'une sonnerie électrique, et plus souvent encore à l'aide du ***sifflet à vapeur***. Par là, non seulement le chauffeur se trouve informé du danger qui commence à naître, mais tout le monde l'est avec lui. Sa négligence se trouve donc connue du personnel préposé

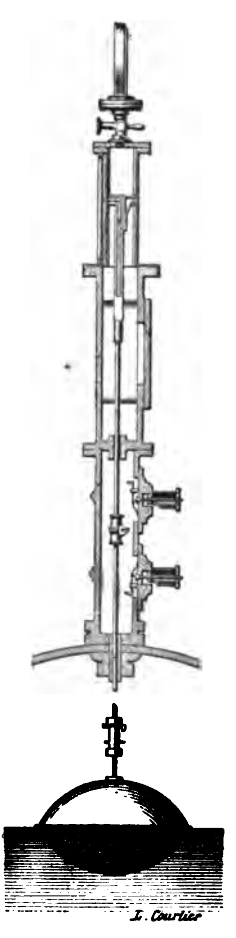


Fig. 736.
Indicateur magnétique
Lethuillier-Pinel.
(Coupe verticale).

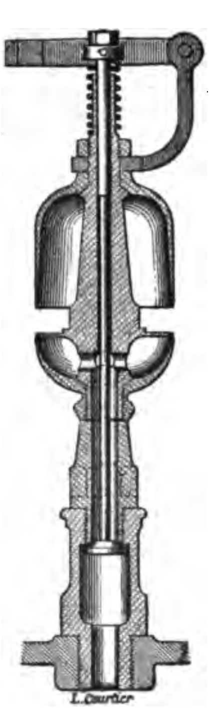


Fig. 737.
Sifflet à vapeur.
(Coupe verticale).

à la surveillance ce qui fournit une garantie pour tenir son attention en éveil.

Le sifflet (fig. 737) est constitué par un timbre métallique en forme de cuvette renversée. Sur son arête circulaire vient se briser

une lame cylindrique de vapeur, au moment où l'issue se trouve ouverte, soit à la main, soit par la tige de l'appareil.

L'organe qui commande ici cette tige est le plus souvent un flotteur, formé d'une lentille métallique creuse. Pour éviter le danger des rentrées d'eau, qui viendraient fausser les indications à l'insu du personnel, on emploie aussi une grosse pierre partiellement équilibrée par un contrepoids.

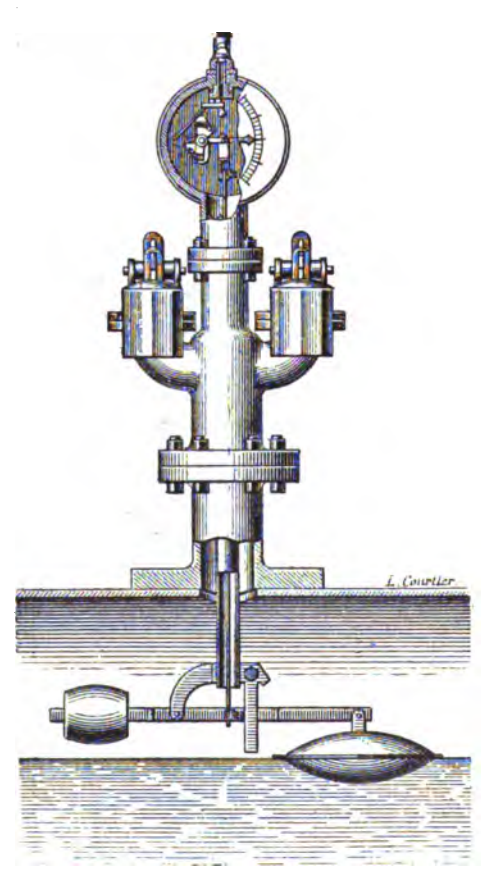


Fig. 738. — Sifflet d'alarme Édouard Bourdon. (Élévation).

Afin d'écarter le danger de coincements, ou simplement la dureté du mouvement rectiligne de la tige, M. Edouard Bourdon [1] utilise, pour la transmission, la rotation du levier qui réunit le flotteur à son contrepoids, et dont l'axe sort de la chaudière à travers un collier à étoupes facile à entretenir en bon état de service (fig. 738).

Le flotteur peut d'ailleurs, comme nous l'avons vu pour les régulateurs d'alimentation (n° 1127), être remplacé par un tube horizontal extérieur, qui se dilate plus ou moins suivant qu'il se trouve rempli d'eau ou de vapeur, d'après les variations du niveau.

On atteint encore le même but avec un avertisseur électrique,

[1] Ser. *Physique industrielle*, t. II, p. 150.

formé d'un flotteur en bois carbonisé recouvert de caoutchouc, et terminé aux deux bouts par un cône creux en platine. Une tige de laiton traverse tout le système pour en solidariser les extrémités. Le flotteur vient fermer un circuit en arrivant au contact de pièces métalliques, et il met alors en mouvement une sonnerie.

§ 4

MANOMÈTRE

1208 — *Généralités.* — L'article 7 du décret du 30 avril 1880 prescrit que toute chaudière doit être munie d'un manomètre en bon état. Ce serait donc une contravention d'en installer un seul pour tout un groupe de générateurs.

Cet appareil est placé en vue du chauffeur, et une marque très apparente indique sur l'échelle la limite que la pression effective ne doit pas dépasser. Toutefois la graduation se prolonge un peu au-delà, pour permettre d'apprécier les situations dangereuses.

Cette graduation indique la *pression effective* en kilogrammes par centimètre carré. Elle commence donc par zéro, pour le moment où la chaudière est froide, et ouverte à l'air libre. Les anciens manomètres indiquaient la tension absolue en atmosphères, et leur graduation commençait par l'unité. Ce serait également une contravention d'en employer encore.

Un ajutage terminé par une bride de 40 millimètres de diamètre, sur une épaisseur de 5 millimètres, est disposé pour recevoir le manomètre vérificateur. Cette tubulure est munie d'un robinet, que l'on a soin de manœuvrer prudemment afin de ne pas détérorier l'instrument, au moment où on le met en contact avec la tension.

1209 — *Manomètre à air libre.* — Le seul système qui fournisse de lui-même des indications indiscutables est le *manomètre hydrostatique à air libre.* L'instruction ministérielle du 23 juillet 1843 renferme sur sa construction des détails circonstanciés, que l'on trouve d'ailleurs dans les traités de physique.

Toutefois ces appareils ont disparu de la pratique courante. Ils présentent en effet divers inconvénients. Le métal s'oxyde, et son ménisque perd alors sa convexité. Il ronge les garnitures. Il ne mouille pas le verre; la graisse s'insinue par cet interstice, ternit le verre et entrave les lectures. Par-dessus tout, la hauteur de la colonne mercurielle devient impraticable pour les hautes pressions (1). Le manomètre hydrostatique ne sert plus aujourd'hui qu'à permettre de tarer et de vérifier fréquemment les appareils plus usuels (2).

J'indiquerai cependant deux dispositions ingénieuses qui avaient été proposées pour éviter l'inconvénient de la hauteur.

Dans les appareils Galy-Cazalat (3), Thomas (4), Journeux (5), Cornu (6), un double piston se trouve en contact, par deux sections

(1) On ne saurait, à ce propos, passer sous silence, au point de vue scientifique, la manière dont cette difficulté a été vaincue dans les deux remarquables installations de M. Cailletet à la tour Eiffel (*Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, 1891), et de M. Amagat (*Annales de chimie et de physique*, 5e série, t. XIX) au puits Verpilleux des houillères de Saint-Étienne.

Tresca. Note sur les moyens d'estimation des grandes pressions. *Annales du Conservatoire*, 20 novembre 1868. — Marié. Mesure exacte des hautes pressions. *Annales des mines*, 7e série, t. XIX, p. 104.

(2) Manomètres : Bossuet. Haton de la Goupillière. *Traité des mécanismes*, p. 337. — Challeton (Denfer. *Traité pratique des chaudières à vapeur*, p. 28. — Péclet. *Traité de la chaleur*, t. II, p. 51). — Charton. Haton de la Goupillière. *Traité des mécanismes*, p. 336. — Clair. *Ibidem*, p. 336. — Clémenceau. *La lumière électrique*, t. XIII, p. 450. — Collardeau. *Bulletin de la Société d'encouragement*, 1827, p. 118. — Dedieu. Couche. *Voie, matériel roulant, exploitation technique des chemins de fer*, t. III, p. 155. — Desbordes (*Bulletin de la Société d'encouragement*, 1856, p. 389. — Péclet. *Traite de la chaleur*, t. II, p. 51). — Ducomet. Ser. *Physique industrielle*, t. II, p. 159. — Giroud. Haton de la Goupillière. *Traité des mécanismes*, p. 335. — Johnson. *Ibidem*, p. 336. — Leblanc et Loiseau. *Annales des Mines*, 8e série, t. I, p. 353. — Léon et Guichard (*Bulletin de la Société d'encouragement*, 1866, p. 313. — *Portefeuille économique des machines*, 1874, pl. 29. — *Revue industrielle*, 23 avril 1884, p. 161. — Maldant. *Ibidem*, 3 mai 1890, p. 175. — Melvin. *American machinist*, 21 mai 1881, p. 1. — Meyer. Haton de la Goupillière. *Traité des mécanismes*, p. 336. — Mignot (*Bulletin de la Société d'encouragement*, septembre 1890, p. 625. — *Revue industrielle*, 19 septembre 1891, p. 376. — *Portefeuille économique des machines*, 3e série, t. IX, p. 62). — Muller. *La lumière électrique*, 1er octobre 1887, p. 44. — Pfitzenreiter. Haton de la Goupillière. *Traité des mécanismes*, p. 336. — Rivals. *Ibidem*, p. 334. — Schnitz *Ibidem*, p. 337. — Tournan. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. CX, p. 450.

(3) Péclet. *Traité de la chaleur*, t. II, p. 46.— *Bulletin de la Société d'encouragement*, 1846, p. 526, 596.

(4) *Ibidem*, 1843, p. 83.

(5) *Ibidem*, 1850, p. 449.

(6) *La science pour tous*, 27 mars 1869, p. 129.

notablement différentes, avec la vapeur sur son petit diamètre, et avec le mercure sur sa grande base (fig. 739). La hauteur de ce métal se trouve d'après cela réduite dans le rapport inverse des sections.

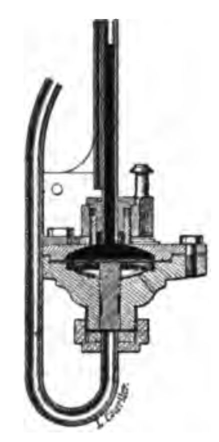


Fig. 739. — Manomètre Galy-Cazalat. (Coupe verticale).

Le manomètre Richard ([1]), dont le principe avait été déjà indiqué par Frimot ([2]), présente un tube sinueux (fig. 740, 741), qui renferme, dans ses divers coudes inférieurs, des index de mercure, reliés entre eux par des tampons d'eau interposés. Tous se dévient à la fois de la position normale, pour équilibrer la tension de vapeur. La hauteur de chacune des dénivellations est par suite très amoindrie. On peut s'en rendre compte à l'aide du calcul suivant (fig. 742).

La droite CC′ correspond à la situation de non-pression. Les ménisques inférieurs A s'abaissent par-dessous,

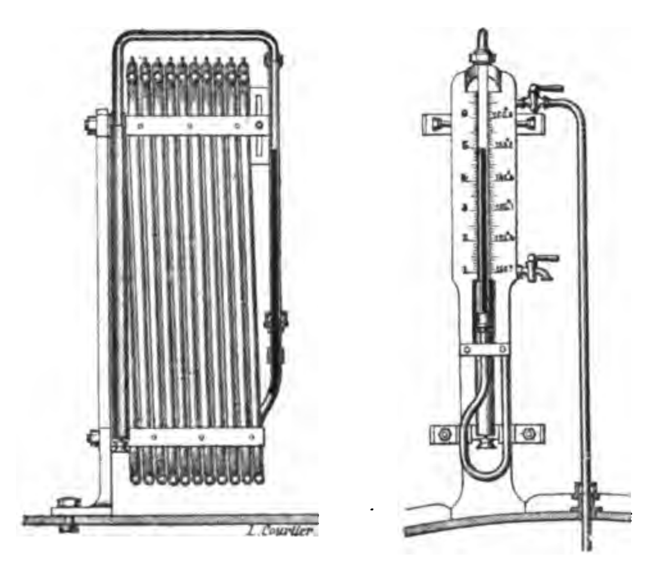


Fig. 740 et 741. — Manomètre Richard (élévations antérieure et latérale).

([1]) Combes. *Annales des mines*, 1845, 1er sem., p. 481. — *Bulletin de la Société d'encouragement*, 1845, p. 225.
([2]) *Ibidem*, 1831, p. 534

et les plans supérieurs B s'élèvent au-dessus, d'une même quantité h. La hauteur mercurielle est donc $2h$ dans chaque branche. Il suit de là que le ménisque A_n supporte d'un côté la pression p de la vapeur, et de l'autre l'influence réunie de la pression atmosphérique p_0, plus n colonnes métalliques, et moins les $n-1$

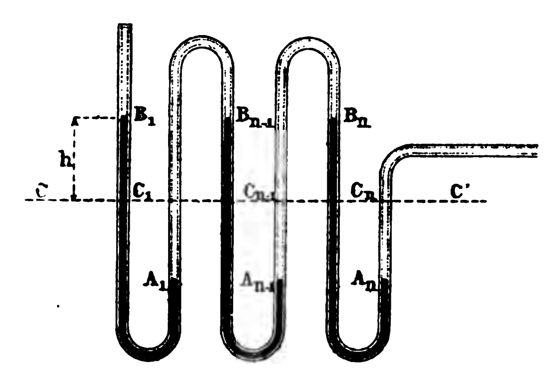


Fig. 742. — Manomètre Richard (figure schématique).

colonnes d'eau qui sont interposées entre ces dernières, et dont le poids tend à contre-balancer en partie les hauteurs mercurielles. On aura, par conséquent, en appelant Π, ϖ les poids spécifiques des deux liquides :

$$p = p_0 + 2\,n\Pi h - 2\,(n-1)\,\varpi h.$$

Si donc H désigne la hauteur de mercure qui mesurerait, dans un manomètre ordinaire, la pression effective :

$$\mathrm{H} = \frac{p - p_0}{\Pi},$$

on peut écrire :

$$\Pi\mathrm{H} = 2\,h\left[n\,(\Pi - \varpi) + \varpi\right],$$

d'où, en remplaçant Π par $13{,}6\ \varpi$:

$$\frac{h}{\mathrm{H}} = \frac{6{,}8}{12{,}6\,n + 1}$$

Si, par exemple, on emploie dix colonnes mercurielles, on aura :

$$\frac{h}{H} = 0,0535 ;$$

de telle sorte que chaque kilogramme de pression effective s'accusera par une différence de niveau de 4 centimètres, de part et d'autre de la ligne de foi.

1210 — *Manomètre Bourdon.* — On n'emploie plus aujourd'hui pour les chaudières à vapeur que le *manomètre élastique*, qui est tout à la fois économique, sensible et très commode. Vidie (¹) avait imaginé autrefois de faire fléchir sous l'action de la pression un disque d'acier. Le degré passager d'emboutissage de cette membrane, convenablement amplifié, était transmis à une aiguille indicatrice.

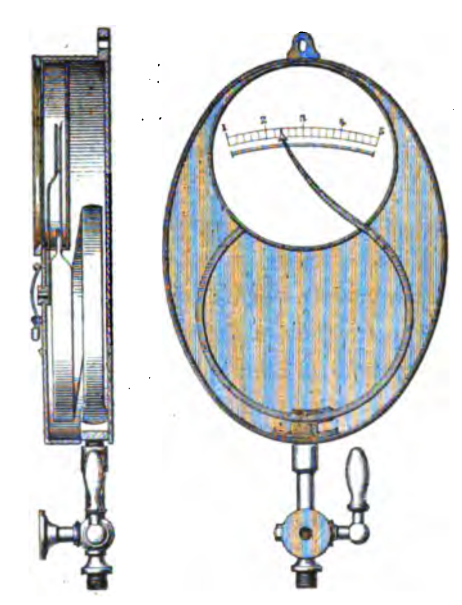


Fig. 743 et 744. — Manomètre Bourdon. (Élévations latérale et antérieure).

Bourdon (²) a donné au principe toute sa valeur, par son invention du tube spiral aplati (fig. 743, 744). La section transversale de ce tuyau est une sorte d'ellipse très allongée; son profil longitudinal, une spirale d'Archimède. La vapeur étant admise dans l'intérieur tend, en raison de sa

(¹) *Bulletin de la Société d'encouragement*, 1886, p. 313.

(²) *Ibidem*, 1851, p. 197. — Résal (*Mécanique générale*, t. IV, p. 200. — *Annales des mines*, 6ᵉ série, t. XI, p. 381). — Armengaud (*Publication industrielle*, t. XXIV, p. 161. — *Machines-outils et appareils*, t. VII). — *Revue technique de l'Exposition de 1889*, 6ᵉ partie, t. I, p. 304, 311. — Péclet. *Traité de la chaleur*, t. II, p. 50. — Rankine. *Manuel de la machine à vapeur*, traduction Richard, p. 118.

pression, à occuper le plus grand volume possible et, par suite, à rapprocher la forme de la section de celle qui renferme la plus grande surface sous un même périmètre, à savoir, le cercle. Les rayons de courbure se modifient donc aux sommets de l'ellipse. Si nous continuons, dans ce raisonnement, à faire abstraction de l'extensibilité tangentielle du métal, le théorème de Gauss relatif aux déformations des surfaces flexibles nous apprend que le produit des deux rayons de courbure principaux doit rester constant en un même point. Or, les sections principales de la surface tubulaire sont évidemment, aux sommets de l'ellipse, son plan de section droite et le plan de symétrie générale. Le rayon de courbure de la première ayant changé, celui de la spirale doit se modifier en raison inverse. La courbe s'ouvrira par conséquent d'une manière variable avec la pression. Mais l'une de ses extrémités est fixe, et sert à mettre l'appareil en communication avec la chaudière. L'autre bout parcourra donc une certaine excursion, que l'on utilise pour actionner une aiguille le long d'un arc gradué.

M. Édouard Bourdon a porté, par ses soins, l'œuvre de son père à une grande perfection. Il est bon d'éviter l'admission directe de la vapeur chaude dans le tube spiral, à cause des altérations qui pourraient en résulter. On établit à cet effet la communication à l'aide d'un conduit assez long. Il se remplit d'eau de condensation, et celle-ci transmet la pression. Un robinet permet d'isoler ce liquide, et de détacher l'appareil sans laisser tomber la pression, quand il peut y avoir intérêt, pour un motif quelconque, à le déplacer en cet état.

1211 — *Manomètres divers.* — Je mentionnerai encore rapidement un certain nombre d'appareils, dont la plupart n'existent plus guère qu'à l'état de souvenir.

Le *manomètre à air comprimé* est fondé sur l'élasticité de ce gaz. Son emploi avait été autorisé par l'ordonnance de 1843 pour les locomotives et les locomobiles. Mais il a depuis longtemps disparu de la pratique. Il présentait en effet un grave défaut. D'après la loi de Mariotte, la graduation se resserre de plus en plus aux grandes tensions. On obtient donc, dans les lectures, d'autant moins de

précision que le danger augmente davantage. On avait, il est vrai, proposé de remédier à cet inconvénient par l'emploi de tubes coniques.

Le *thermomanomètre* (1) a joué un rôle éphémère. On désignait sous ce nom un thermomètre à mercure qui était plongé dans la vapeur, et dont la tige, sortant de la chaudière, était graduée en kilogrammes de pression, d'après la loi de correspondance des

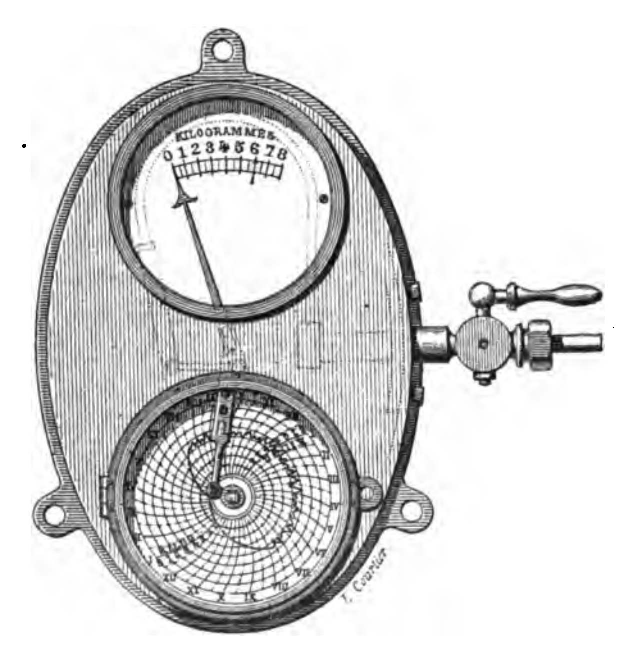


Fig. 745. — Manomètre enregistreur Bourdon (élévation).

tensions et des températures. Le réservoir de verre était préservé de toute déformation par une enveloppe métallique, remplie d'une matière conductrice telle que la limaille de cuivre.

Le *thalpotasimètre* (2) de Schœffer et Budenberg est également un thermomètre à tension, qui peut jouer à volonté les deux rôles, fournissant la pression en fonction de la température, ou réciproquement.

(1) Michel Lévy. *Annales des mines*, janvier-février 1884. — *Bulletin de la Société d'encouragement*, 1827, p. 118.

(2) *Génie civil*, t. VII, p. 157. — *Revue des questions scientifiques de la Société de Bruxelles*, 20 octobre 1886, p. 640.

Le *télémanomètre* (1) est destiné à transmettre à distance l'indication des pressions.

Le *manomètre à maxima* (2) a pour objet la constatation des fautes du chauffeur. Un index est poussé par l'aiguille, sans pouvoir de lui-même rétrograder. Une serrure plombée le soustrait à l'action de l'ouvrier. Sa position accuse donc la plus grande élévation qu'ait subie la tension, dans l'intervalle de deux contrôles.

Le *manomètre enregistreur* (3) remplit la même mission d'une manière bien plus complète (fig. 745), car il renseigne à la fois sur toutes les circonstances du fonctionnement, au moyen du tracé d'une courbe. A cet effet l'aiguille porte une pointe traçante qui, sous l'influence des oscillations de la tension, s'éloigne plus ou moins du centre d'un disque de papier, animé d'un mouvement uniforme de rotation qui s'accomplit en vingt-quatre heures.

Il existe des *manomètres à vide* pour le service des condenseurs, dont la pression est inférieure à celle de l'atmosphère.

§ 5

SOUPAPE DE SURETÉ

1212 — *Généralités.* — D'après l'article 6 du décret du 30 avril 1880, chaque chaudière est munie de deux *soupapes de sûreté* (4), chargées de manière à laisser la vapeur s'écouler dès que

(1) *American machinist*, 20 août 1887, p. 4.

(2) *Annales des ponts et chaussées*, 1859, 2e semestre, p. 49. — *Bulletin de la Société d'encouragement*, 1889, p. 572.

(3) Manomètres enregistreurs : Bourdon. Ser. *Physique industrielle*, t. II, p. 160. — Edson. Rankine. *Manuel de la machine à vapeur*, traduction Richard, p. 605. — Naudin. *Revue industrielle*, 27 février 1884, p. 91. — Richard. Ser. *Physique industrielle*, t. II, p. 161.

(4) Bour. Les soupapes de sûreté. *Annales de la Société des sciences industrielles de Lyon*, 1887, p. 197. — Delaporte. Calcul des soupapes de sûreté. *Revue industrielle*, 1881, p. 104. — Thomard. Diamètre des soupapes de sûreté. *Revue universelle des mines et de la métallurgie*, t. XXX, p. 31. — Léauté. Soupapes de sûreté. *Génie civil*, 26 juillet 1884. — G. Richard (*Revue générale des chemins de fer*, 1881, 1er semestre, p. 169. — *La chaudière locomotive*, in-4°, p. 247. — Claudel. *Aide-mémoire*, p. 622. — *Génie civil*, t. II, p. 411 ; V, 210, 263. — *Comptes rendus mensuels des séances de la Société de l'industrie minérale de Saint-Étienne*, septembre 1875, p. 9 ; 1881, 69,

sa pression effective atteint la limite maximum indiquée par le timbre réglementaire ([1]).

218 ; 1885, 41. — *Portefeuille économique des machines*, 1874, pl. 53, 54 ; 1879, pl. 5, 6. — Rankine. *Manuel de la machine à vapeur*, traduction Richard, p. 126.

Flannery. On safety valves. *Institution of naval architects*, avril 1877. — Buell. *Safety valves*. 1 vol. New-York, 1875. — Brownley. Report on safety valves. *Institution of Engineers and Shipbuilders in Scotland*, décembre 1874. — Robson. On the advantages of springs for loading safety valves. *Ibidem*, février 1874. — Report on safety valves and steam ganges. *Journal of Franklin Institute*, décembre 1867. — Wilson. On the construction of safety valves. *Institution of mechanical Engineers*, juillet 1877. — The sticking of safety valves. *Engineering*, 29 septembre 1876, p. 277. — Mac Farlane Gray. On safety valves and steam in motion. *Nautical Magazine*, juillet 1872. — Calcul des soupapes de sûreté. *The Engineer*, 26 juin 1891, p. 513. — Messinger. *Complete instructions for the designs of spring and other safety valves*, 1 vol. — Soupapes à charge constante. *The Engineer*, 27 février 1874. — Parker. Explosion du « Thunderer ». *Engineering*, 1876, 2ᵉ vol., p. 216.

Burg. Ueber die Wirksammkeit der Sicherheitsventile. *Comptes rendus des séances de l'Académie des sciences de Vienne*, t. XLV, p. 312.

([1]) Soupapes de sûreté : Aschroft. Richard. *La chaudière locomotive*, p. 274. — Ashton. *Ibidem*, p. 292. — Attoch. *Ibidem*, p. 275. — Baillie. Couche. *Voie, matériel roulant, exploitation technique des chemins de fer*, t. III, p. 151. — Barçon (*Annales des mines*, avril 1887, p. 171. — *Revue industrielle*, 10 novembre 1887, p. 444 ; 9 novembre 1889, p. 446). — Bateman. *Iron*, 7 mai 1880, p. 328. — Bayley. Richard. *La chaudière locomotive*, p. 282. — Blake. *Ibidem*, p. 281. — Bodmer et Labeyrie. *Annales des mines*, 1859, 1ᵉʳ semestre, p. 439. — Ed. Bourdon. *Revue technique de l'Exposition de* 1889, 6ᵉ partie, t. I, p. 314. — Brierley et Mitchell. Richard. *La chaudière locomotive*, p. 279. — Castelnau. *Génie civil*, 6 février 1886, p. 213. — Cockburn. *Annales des mines*, 8ᵉ série, t. XVI, p. 143. — Chaussenot. Péclet. *Traité de la chaleur*, t. II, p. 62. — Coret (*Annales des mines*, 8ᵉ série, t. XI, p. 179. — *Revue industrielle*, 13 octobre 1887, p. 405). — Correns. Richard. *La chaudière locomotive*, p. 268. — Courtin. *Revue universelle des mines et de la métallurgie*, 1875, t. I, p. 346. — Croll. Richard. *La chaudière locomotive*, p. 266. — Crépin. *Annales industrielles*, 1883, t. I, p. 201. — M. Deprez (Marié. *Institution of mechanical Engineers*, août 1880. — Cailletet. *Annales de chimie et de physique*, 5ᵉ série, t. XIX, p. 388). — Dunkel. Richard. *La chaudière locomotive*, p. 288. — Eaves. *Ibidem*, p. 281. — Falk et Frazier (*Scientific american*, 10 janvier 1885, p. 18. — *American journal of railway appliances*, 1ᵉʳ avril 1885, p. 164). — Fenton. Richard. *La chaudière locomotive*, p. 281. — Field. *Ibidem*, p. 266. — Foster. *Ibidem*, p. 278. — Giles. *Ibidem*, p. 275. — Giquet Denvan. *Bulletin de la Société industrielle du nord de la France*, 14ᵉ année, nº 54, p. 48. — Guénet (*Revue industrielle*, 27 janvier 1887, p. 35. — *Comptes rendus mensuels des séances de la Société de l'industrie minérale de Saint-Étienne*, 1886, p. 81). — Hafner. Ser. *Physique industrielle*, t. II, p. 168. — Hallam. *Annales des mines*, 8ᵉ série, t. XVI, p. 143. — Hartmann. *Ibidem*, p. 275. — Hast. *Ibidem*, p. 290. — Hawthorne. *Ibidem*, p. 288. — Holt. *Ibidem*, p. 288. — Hopkinson. *Annales industrielles*, 1885, t. I, p. 348. — Jenkin's. *American machinist*, 8 avril 1882, p. 4. — Kappteyn. *Revue universelle des mines et de la métallurgie*, 1875, t. I, p. 401. — Kimkle. *Scientific american*, 14 mars 1891, p. 163. — Kitson. Couche. *Voie, matériel roulant, exploitation technique des chemins de fer*, t. III, p. 153. — Labeyrie. *Annales des mines*, 1869. — Larsoe-Meyer. Richard. *La chaudière locomotive*, p. 268. — Lavington. *The Engineer*, 1876, t. II, p. 147. — Lemonnier et Vallée (Phillips. *Annales des mines*, 5ᵉ série, t. I, p. 337. — *Bulletin de la Société*

Cet organe, inventé par Papin [1], se compose (fig. 746) d'un disque en bronze reposant sur un siège de même nature. Des ailettes disposées en dessous guident son mouvement suivant la verticale. Un pointeau biconique exerce l'effort voulu au centre du clapet, où se trouve pratiquée une petite mortaise conique plus évasée que l'angle du pointeau. Un levier horizontal oscille autour d'une forte goupille. Il supporte à son extrémité un poids, et appuie sur le cône supérieur du pointeau. Un cadre empêche les soulèvements excessifs, qui risqueraient de produire le déversement du système. Le levier présente plusieurs encoches, pour permettre de rapprocher le poids, dans les instants où l'on veut *soulager* la soupape. Il est bon que le point où s'exerce la charge soit placé aussi bas que possible, et au-dessous du centre de gravité, afin d'assurer la stabilité.

d'encouragement, 1852, p. 581. — Couche. *Voie, matériel roulant, exploitation technique des chemins de fer*, t. III, p. 151). — LETHUILLIER-PINEL (*Annales des mines*, 8e série, t. XVI, p. 144. — *Revue industrielle*, 9 avril 1884, p. 144. — *Annales industrielles*. 1884, t. I, p. 430. — *Portefeuille économique des machines*, 1885, p. 36. — Armengaud. *Publication industrielle*, 2e série, t. X, p. 125. — *Bulletin de la Société industrielle du Nord de la France*, 1884, 1885). — LYNDE. *American machinist*. 25 décembre 1886, p. 3. — MANTEL. *Portefeuille économique des machines*, 1883, p. 163. — MARTYN ROBERTS. Richard. *La chaudière locomotive*, p. 282. — MAUREL et TRUEL (Bienaymé. *Les machines marines*, p. 499. — *Portefeuille économique des machines*, 3e série, t. VIII, p. 164). — MEGGENHOFEN. Couche. *Voie, matériel roulant, exploitation technique des chemins de fer*, t. III, p. 151. — MELLING. Richard. *La chaudière locomotive*, p. 288. — MÉNARD. *Ibidem*, p. 290. — MONTUPET. *Ibidem*, p. 285. — MUFFLER. *Scientific american*, 26 juin 1886, p. 402. — NASMITH (Rankine. *Manuel de la machine à vapeur*, traduction Richard, p. 495. — *Engineering*, 1876, t. II, p. 393). — NAYLOR (*La Nature*, 29 octobre 1887, p. 347. — *Comptes rendus mensuels des séances de la Société de l'industrie minérale de Saint-Étienne*, septembre 1875, p. 9). — NICHOLSON. Richard. *La chaudière locomotive*, p. 286. — PARSON. *Ibidem*, p. 281. — PEARSON. *American machinist*, 17 janvier 1885, p 1. — PETERS. Richard. *La chaudière locomotive*, p. 275. — POLLET et WIGZELL. *Ibidem*, p. 283. — POP (*Engineering news*, 10 septembre 1881, p. 362 — *American machinist*, 27 août 1891). — RAILING. *Scientific american*, 20 juin 1885, p. 390. — RAMSBOTTOM. Couche. *Voie, matériel roulant, exploitation technique des chemins de fer*, t. III, p. 150. — RICHARDSON. *Ibidem*, p. 931. — ROCHFORD. *Annales des mines*, 8e série, t. XVI, p. 143. — ROCHOW. *Ibidem*, p. 296. — ROSATE. *Bulletin technologique de la Société des anciens Élèves des Écoles d'arts et métiers*, 1888, p. 906. — SCHMIED. *Bulletin de la Société d'encouragement*, 5e série, t. III, p. 513. — SCOWEL. Richard. *La chaudière locomotive*, p. 290. — SEATON et CAMERON. *Engineering*, 25 novembre 1881, p. 531. — SMITH. Richard. *La chaudière locomotive*, p. 290. — SOREL. Péclet. *Traité de la chaleur*, t. II, p. 67. — STUART. Richard. *La chaudière locomotive*, p. 291. — TURNBULL. *Ibidem*, p. 283. — TURTON. *Ibidem*, p. 268. — WEBB. *Ibidem*, p. 286. — WEIR. *Ibidem*, p. 290.

[1] Denis Papin. *A new digester*, 1681.

Désignons par P le poids suspendu, par p celui de la soupape, Π celui du levier, et par L, l, λ les distances de l'axe de rotation aux centres de gravité correspondants. Si F représente l'effort anta-

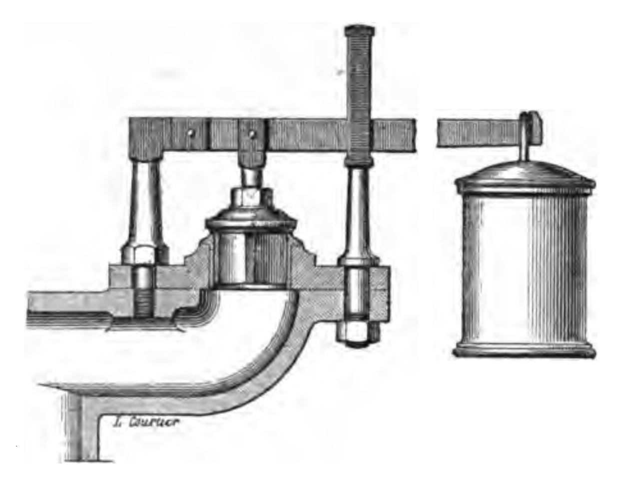


Fig. 746. — Soupape de sûreté (coupe verticale).

goniste qui est opposé en dessous par la vapeur [1], avec le même bras de levier l, on aura, en posant pour l'équilibre l'équation des moments :

$$Fl = PL + pl + \Pi\lambda,$$

c'est-à-dire :

$$F = p + \frac{PL + \Pi\lambda}{l}.$$

On reste donc maître de faire jouer la soupape sous l'action d'efforts variables F, en disposant de L par le rapprochement du poids dans les divers crans.

[1] Cet effort est le produit de la pression rapportée à l'unité de surface par une aire dont la valeur reste un peu incertaine, selon le degré de précision de la portée. L'ordonnance de 1843 prescrivait à cet égard de ne pas dépasser, pour l'épaisseur e de la couronne d'appui, $\frac{1}{30}$ de la valeur du diamètre d. Le rapport de cette portée πde à l'aire théorique $\frac{\pi d^2}{4}$ étant $\frac{4e}{d}$, pouvait ainsi atteindre $\frac{2}{15}$. Or une incertitude de 13 °/₀ sur la pression serait déjà des plus fâcheuses. Le plus sûr est de faire le calcul d'après le diamètre intérieur, et de réduire le plus possible le portage.

Sur les locomotives et dans les machines de navigation, les ballottements de ce poids seraient gênants et enlèveraient toute précision. On le remplace alors par un ressort spiral [1], protégé par un étui en laiton (fig. 747). Il convient d'en mettre deux, en cas de rupture. On les appelle *balances*. Ces appareils sont difficiles à régler, et se dérèglent ensuite facilement. Leur tension est marquée par un index mobile devant une échelle graduée. Pour empêcher que le chauffeur ne puisse les tendre abusivement, on dispose un arrêt de butée.

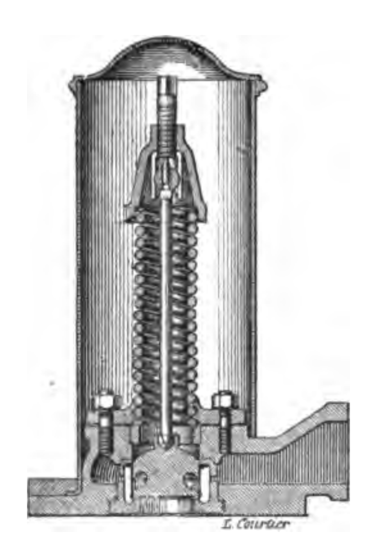


Fig. 747. — Soupape de sûreté Lethuillier-Pinel à ressort (coupe verticale).

L'inconvénient évident de ce système est le remplacement d'une force constante, capable de satisfaire à l'équation précédente, par un effort qui varie avec les allongements, aux divers instants de la levée. Pour cette raison, outre que les soulèvements sont très réduits, on prend des ressorts très longs, afin de diminuer l'allongement *relatif*, qui règle la valeur de la force élastique.

1213 — *Calage des soupapes*. — Tout ce qui tend à coincer, caler ou surcharger les soupapes de sûreté, doit être écarté avec la plus grande sollicitude.

C'est quelquefois la malveillance extérieure. C'est trop souvent l'imprudence du chauffeur [2], qui veut rester maître de sa pression, et empêcher les soupapes de *souffler* [3], ou encore sa négligence à

(1) Quelquefois par des rondelles Belleville.

(2) On a imaginé diverses soupapes dites *incalables* : Corbt, Nicholson et Allcock, Ramsbottom et Webb, Turnbull. Elles sont pour la plupart fort ingénieuses, mais assez compliquées. En outre on se trouve entravé, quand on veut toucher aux appareils pour s'assurer qu'ils jouent librement.

(3) A la mer, pour ne pas être gêné par la vapeur des soupapes, et pour ne pas perdre inutilement de l'eau distillée, on a proposé (système Maurel) de conduire cet échappement au condenseur.

entretenir les appareils en bon état, de telle sorte que le cambouis vient en entraver le jeu, surtout après un long chômage.

Ce peut être également la déformation des pièces, ou le coincement des ailettes. Pour éviter cet inconvénient, il faut les faire assez longues (1), en les alésant sur un diamètre un peu moindre que celui de l'ajutage. On a imaginé (2) l'emploi d'un galet en développante de cercle, afin d'exercer l'effort dans une direction bien verticale. On a enfin proposé, pour écarter radicalement les chances de coincement, des soupapes *sphériques* (3).

Par-dessus tout, il faut éviter les dispositions qui tendent à gêner les dilatations du siège métallique, et à les forcer de s'effectuer *vers l'intérieur*. L'explosion désastreuse du Thunderer (n° 1153), dont les chaudières étaient neuves, n'a pas eu d'autre cause (4).

1214 — *Section d'écoulement.* — La détermination de la section qu'il y a lieu d'offrir à l'écoulement de la vapeur, constitue le point essentiel de la théorie des soupapes de sûreté. L'article 6 du décret du 30 avril 1880 exige deux appareils distincts, afin d'écarter autant que possible les conséquences fatales de la mise hors de service accidentelle d'un système unique. Mais chacun d'eux doit être en état de suffire à lui tout seul. Le texte réglementaire autorise d'ailleurs le constructeur à répartir à son gré la section d'écoulement nécessaire des deux soupapes exigées, sur un plus grand nombre. Pour les récipients, au contraire (article 32), une seule soupape est exigible.

Cette section d'écoulement doit être particulièrement large pour les foyers à air forcé. Elle dépend directement de la levée; mais d'une manière dont on peut augmenter l'efficacité au moyen d'artifices semblables à ceux que nous avons étudiés (p. 139) à propos de

(1) Haton de la Goupillière. *Traité des mécanismes*, p. 381.

(2) Système Montupet.

(3) Systèmes Blake, Eaves, Fenton, Hopkinson, Parson. Dans le type Nasmyth, les boulets sont munis d'ailettes qui plongent dans l'eau, toujours agitée, ce qui leur imprime un mouvement incessant, dont l'effet est de les roder et d'assurer l'étanchéité. On leur communique en même temps par là une certaine stabilité, qui manque trop aux simples boulets flottant sur la vapeur (Richard. *La chaudière locomotive*, p. 281).

(4) *Engineering*, 1876, 2e vol, p. 216.

la distribution de la vapeur : soupapes à plusieurs sièges ([1]), à grille ([2]), à piston ([3]), clapets différentiels dont deux parties se meuvent dans des sens opposés ([4]).

1215 — Il n'y a pas d'ailleurs à compter uniquement sur la levée spontanée, pour dégorger efficacement la pression. Lorsque les soupapes viennent à souffler, le chauffeur ne doit pas rester inactif. Il faut qu'il les soulage pour aider à l'écoulement, en même temps qu'il tient compte de cette circonstance dans la conduite de son feu.

Sous ce rapport, la soupape de sûreté devient un avertisseur. L'article 6 du décret du 30 avril 1880 s'exprime en effet ainsi : « L'orifice de chacune des deux soupapes doit suffire à maintenir (celle-ci étant au besoin convenablement déchargée ou soulevée, et quelle que soit l'activité du feu) la vapeur dans la chaudière à un degré de pression qui n'excède pour aucun cas la limite fixée. » En outre la circulaire ministérielle du 21 juillet 1880, dans son 23e alinéa, renferme le passage suivant : « La soupape de sûreté doit être considérée, non comme un appareil automatique limitant au degré voulu la tension de la vapeur, mais comme un appareil indiquant matériellement que cette tension a atteint le maximum qui ne doit pas être dépassé, et qui le serait, la plupart du temps, si la soupape n'était pas déchargée ou soulevée de manière à offrir à la vapeur un écoulement suffisant. »

1216 — La détermination de la section nécessaire pour remplir ces conditions reste à l'appréciation de chacun, sous sa propre responsabilité, depuis que le décret du 25 janvier 1865 est venu abroger l'ordonnance du 23 juillet 1832, qui avait édicté à cet égard une formule réglementaire. Celle-ci peut d'ailleurs être encore consultée à titre de renseignement très utile.

([1]) Blake, Church, Findley, Friedmann, Hallam, Hawkley-Wilke, Holt, Hopkinson, Hosking, Melling, Roxby (Richard. *La chaudière locomotive*, p. 289).

([2]) Dunkel, Hawthorn.

([3]) Haste, Maurel et Truel, Ménard, Scowell, Stuart, Weir.

([4]) Alidon et Mambre, Bullough, Franklin, Gedge, Giles, Hudson, Lees, Minot, Roberts, Smith, Storey, Wyse.

Elle était donnée sous la forme :

$$d = 2{,}6\sqrt{\frac{S}{n - 0{,}412}},$$

mais n y représentait la pression *absolue*, en *atmosphères*, d le diamètre en *centimètres*, S la surface de chauffe en mètres carrés. Pour employer de préférence des unités homogènes et conformes à la réglementation actuelle, nous appellerons D le diamètre en *mètres* :

$$D = \frac{d}{100}, \qquad d = 100\,D;$$

et N la pression *effective* en *kilogrammes par centimètre carré* :

$$1{,}033\,(n - 1) = N, \qquad n = \frac{N}{1{,}033} + 1.$$

Il vient par cette substitution :

$$D = 0{,}0264\sqrt{\frac{S}{N + 0{,}607}}.$$

1217 — Considérons comme exemple un générateur de 25 mètres carrés de surface de chauffe, timbré à 4 kilogrammes :

$$N = 4, \qquad S = 25.$$

La formule donne alors :

$$D = 0^{m},0607.$$

La section d'écoulement à travers l'ajutage sera donc :

$$\frac{\pi}{4}\,(0{,}0607)^2 = 0^{m^2},002\,826.$$

Il convient toutefois de réduire ce nombre de $\frac{1}{60}$ de sa valeur, pour

tenir compte de la place occupée par les ailettes, et de l'affecter en outre du coefficient de contraction 0,93 [1] :

$$\frac{59}{60} \times 0,93 \times 0,002\,826 = 0^{m^2},002\,583.$$

Or nous avons vu ci-dessus [2] que la vitesse d'écoulement de la vapeur, dans ces conditions, est de 734 mètres par seconde. Le débit aura donc comme valeur :

$$0,002\,583 \times 734 = 1^{m^3},896.$$

Si nous admettons d'autre part que chaque mètre carré de surface de chauffe vaporise par heure 20 kilogrammes d'eau (n° 935), nous aurons, pour les 25 mètres carrés et par seconde :

$$\frac{20 \times 25}{60 \times 60} = 0^{kg},139.$$

L'expansion que subit un kilogramme liquide par sa vaporisation, sous une pression qui peut ici être confondue avec 5 atmosphères, est : $u = 0^{m^3},3617$ [3]. Le volume effectif qu'il s'agit d'écouler sera donc :

$$0,3617 \times 0,139 = 0^{m^3},050.$$

Le rapport de ces deux débits a pour valeur :

$$\frac{1,896}{0,050} = 37,92.$$

Il semble par suite que le conduit d'évacuation sera 38 fois plus que suffisant. Mais il y a beaucoup à rabattre de cet aperçu.

Ce n'est pas en effet seulement l'ajutage qui sert à l'écoulement,

(1) Voy. t. I, p. 444.
(2) Voy. t. I, p. 805.
(3) Voy. t. I, p. 784.

mais aussi la couronne annulaire qui a pour hauteur H la levée du clapet. Sa section est égale à πdH. Logiquement elle devrait offrir le même débouché que le tuyau lui-même, ce qui exigerait :

$$\pi DH = \frac{\pi D^2}{4}, \qquad H = \frac{D}{4},$$

c'est-à-dire une levée égale à la moitié du rayon. Tout au contraire, on n'en donne que de très faibles : un millimètre par exemple. Le débit parallèlement à la paroi se trouve dès lors réduit dans le rapport de 0,001 à $\frac{D}{4}$, c'est-à-dire, pour le cas précédent :

$$\frac{0,0040}{0,0607} = 0,065.$$

Le rapport d'efficacité surabondante devient par suite :

$$0,065 \times 37,92 = 2,465.$$

Il convient d'ailleurs, conformément aux termes du décret, d'envisager la possibilité d'un surmenage du feu capable, par exemple, d'une production deux fois plus active que celle que nous avons admise pour des conditions normales ; et alors le rapport tombe définitivement à la valeur :

$$0,5 \times 2,465 = 1,255.$$

On voit, par ce cas particulier, que la formule satisfait convenablement, mais sans excès déraisonnable, aux nécessités de la question.

1218 — Il reste toutefois une dernière difficulté qui, avec raison, a beaucoup préoccupé les constructeurs. Une section, théoriquement suffisante pour permettre l'écoulement, risque en effet de l'assurer fort mal dans la réalité, en raison de la circonstance suivante.

Lorsqu'une masse gazeuse s'écoule entre deux enceintes, c'est en vertu d'une différence de pression, qui s'échelonne d'une manière continue sur tout le parcours de la veine, entre les parties assez éloignées du débouché, et assez étendues en section transversale, pour que l'on puisse les considérer comme immobiles, et soumises aux tensions ambiantes de ces enceintes, à savoir dans le cas actuel la pression p_1 de la chaudière et celle p_2 de l'atmosphère. Les environs immédiats du clapet présentent donc une tension p intermédiaire entre ces deux dernières.

Or, avant le soulèvement, la masse était en repos, et la force élastique uniforme dans toute son étendue. C'est par conséquent la pression p_1 qui a été capable de soulever la soupape; et dès que le fluide contigu ne se trouve plus qu'à la tension moindre p [1], il ne pourra plus la soutenir. Celle-ci retombera et refermera l'ouverture. L'équilibre se rétablissant, la pression p_1 se reconstituera, et se retrouvera capable de soulever de nouveau le clapet. Puis les mêmes phénomènes se reproduiront. C'est donc un régime de ballottements et d'instabilité, bien différent de l'écoulement continu, qui va prendre naissance, dès que la tension intérieure atteindra le degré p_1 que l'on ne doit pas dépasser. Par suite les dimensions calculées d'après la valeur de p_1 se trouveront pratiquement insuffisantes, et dans une mesure qu'il serait fort difficile d'apprécier théoriquement [2]. Divers moyens ont été proposés pour remédier à ce défaut.

1219 — *Soupape Bodmer et Klotz.* — Dans le système Bodmer et Klotz [3], le chapeau A de la soupape (fig. 748, 749) est soulevé par une atmosphère de vapeur qui puise sa tension à une grande distance, au pied du tube B. Dès que l'écoulement se prononce en C, la tension diminue dans la région environnante D; mais cette

(1) Avec les soupapes à ressort, cet effet s'accroît encore de l'augmentation de tension élastique produite par le soulèvement.

(2) M. Walckenaer a exécuté sur ce sujet une importante série d'expériences (*Annales des mines*, 8e série, t. XVI, p. 124).

(3) *The Engineer*, 1877, t. II, p. 61. — *Proceedings of the Institution of mechanical Engineers*, 1877. — Richard. *La chaudière locomotive*, in-4°, p. 277. — *La Nature*, 6 octobre 1877, p. 293. — *The Railroad Gazette*, 2 décembre 1881, p. 724.

variation ne saurait se faire sentir sous le clapet A par l'intermédiaire du tuyau B, qu'après s'être transmise à travers toute la masse. La soupape restera donc statiquement supportée jusqu'à ce qu'elle ait rempli son office, en déterminant une détente générale de la pression dans toute l'enceinte.

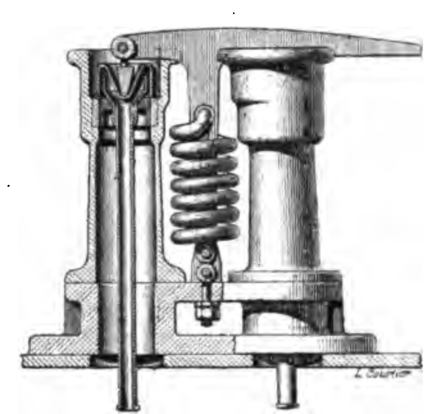



Fig. 748. — Soupape de sûreté Klotz. (Élévation.)

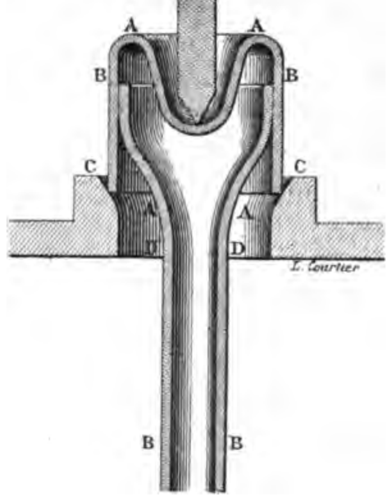


Fig. 749. — Soupape de sûreté Klotz. (Coupe verticale schématique.)

1220 — *Soupape Codron.* — Dans le système Codron [1], l'on accepte au contraire la diminution de pression avoisinante, mais

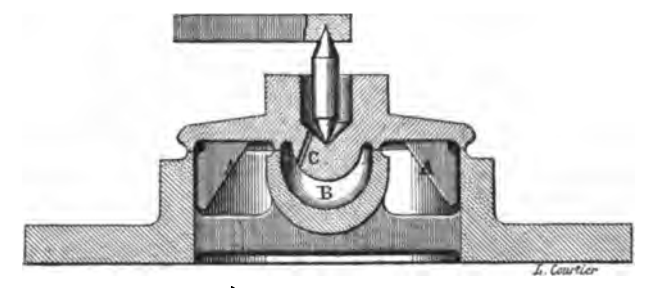


Fig. 750. — Soupape de sûreté Codron (coupe verticale schématique).

on augmente, dès les premiers instants de l'ouverture, l'étendue

[1] Olry. *Annales des Mines*, 8e série, t. I, p. 107. — *Portefeuille économique des machines*, 3e série, t. VIII, p. 164. — *Bulletin technologique de la Société des anciens Élèves des Écoles d'arts et métiers*, juillet 1888. p. 733.

de la surface d'action (fig. 750). Le chapeau est en effet soulevé statiquement par le contact de la vapeur avec l'anneau A; tandis que, dès qu'il quitte son siège, le fluide se répand dans l'espace supplémentaire B, pour compenser, par cette addition d'étendue, la raréfaction dynamique due à l'écoulement. Lorsque le dégorgement est terminé, et que la soupape est définitivement retombée sur sa base, le sifflet C sert à l'évacuation de la petite quantité de vapeur qui remplissait l'espace B. Le rapport des diamètres détermine le degré de sensibilité de l'appareil. Il est malheureusement assez difficile de dresser avec une suffisante précision les diverses surfaces d'appui.

1221 — *Soupape Dulac.* — Le fonctionnement de la soupape Dulac ([1]) repose sur un principe analogue (fig. 751). Seulement la surface supplémentaire de soutien forme une sorte de prolongement latéral de la face interne du chapeau. On peut le comparer à un tronc de cône; cependant son profil est en réalité curviligne, et résulte d'études expérimentales attentivement poursuivies. La vapeur, obligée de s'écarter le long de cet obstacle évasé, lui imprime des forces dont la composante verticale vient en aide pour supporter ce corps.

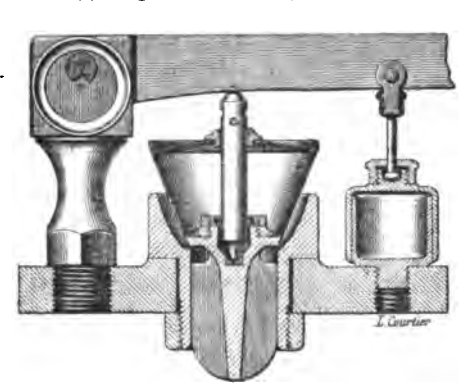


Fig 751. — Soupape de sûreté Dulac (coupe verticale).

1222 — *Soupape Adams.* — Dans le système Adams ([2]), plus nettement encore que dans le précédent, on cherche le remède de

([1]) *Annales des mines*, 1889, p. 124. — *Le Technologiste*, juillet 1887, p. 119. — *Bulletin de la Société d'encouragement*, 25 mars 1892.

([2]) Vicaire. *Annales des mines*, 7ᵉ série, t. XIX, p. 92. — *Portefeuille économique des machines*, 3ᵉ série, t. VIII, p. 164. — Brustlein. *Comptes rendus mensuels des séances de la Société de l'industrie minérale de Saint-Étienne*, 1881, p. 144. — *Le Technologiste*, 8 novembre 1879, p. 707.

la difficulté dans son principe même, qui est la substitution de l'état dynamique à celui de repos. Lorsque le clapet A se soulève (fig. 752, 753), la vapeur passe en B, C, D, en décrivant une trajectoire convexe vers le haut, et d'un très faible rayon de courbure ρ. Son rabattement vers le bas exige une force centripète qui, rapportée à l'unité de masse, a pour valeur $\frac{v^2}{\rho}$. Elle s'accompagne nécessairement d'une réaction égale sur le chapeau, tendant à le soutenir malgré son poids. Plus la vitesse est grande, plus la pression du fluide diminue, il est vrai, mais plus cet appoint $\frac{v^2}{\rho}$ augmente de son côté.

Ce principe des soupapes de sûreté *à gorge* se retrouve également dans un certain nombre d'autres appareils [1].

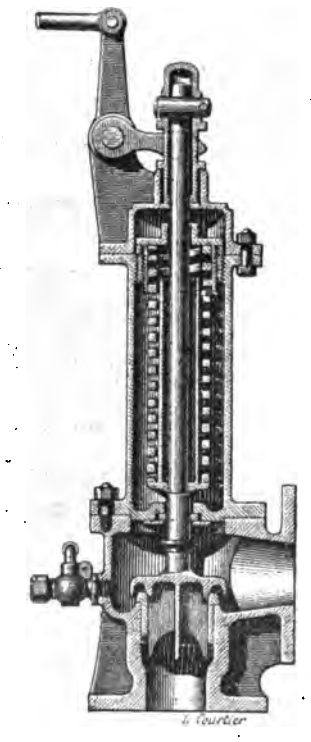


Fig. 752.
Soupape de sûreté Adams.
(Coupe verticale.)

1223 — *Soupape Barbe.* — On a fait un certain bruit, lors de son apparition, autour de la soupape Barbe [2], dont l'inventeur s'était proposé d'évacuer, non plus la vapeur, mais l'eau chaude directement.

Un clapet à contrepoids est placé à la partie inférieure du générateur, au lieu de se trouver, comme à l'ordinaire, sur le sommet. On l'installe à l'arrière, du côté de la cheminée. D'après la disposition du levier, le contrepoids tend à plaquer le clapet de bas en haut. Le pointeau qui exerce cette pression est lui-même mobile autour d'un axe traversant ce levier.

Lorsque la résistance du contrepoids se trouve vaincue, la sou-

[1] Ashcroft, Attock, Black, Brierley et Mitchell, Coulthard, Dickinson, Giles, Hallam, Lethuillier-Pinel, Parson, Peters, Poole, Richardson, Rochford, Rochow.

[2] Armengaud. *Publication industrielle*, 1885, p. 451. — *Annales industrielles*, 1885, t. I, p. 437, 746. — *Bulletin de la Société industrielle de Rouen*, 1886, p. 446.

pape, que rien ne retient plus, tombe dans la fosse; le pointeau chavirant sans pouvoir par un mouvement de bascule, ressaisir le clapet dès que celui-ci a commencé son mouvement.

Cette invention a été combattue par l'Administration et par diverses autorités scientifiques ou industrielles. Elle paraît avoir aujourd'hui disparu de la scène. Elle présente en effet des défauts très graves.

La rapidité de la mise en liberté d'une pareille quantité d'eau surchauffée semble faite pour reproduire en diminutif les effets dynamiques de l'explosion elle-même. Il faut, dans tous les cas,

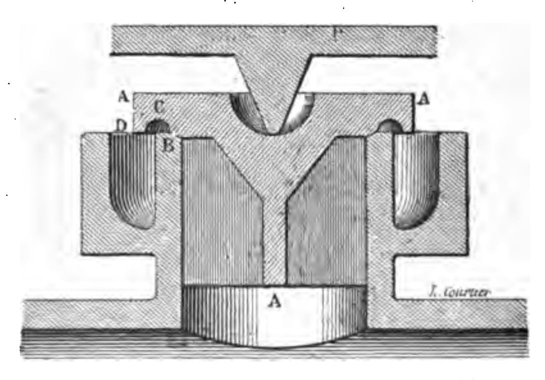


Fig. 753. — Soupape de sûreté Adams (coupe verticale schématique)

recevoir ce liquide dans une fosse profonde, avec des moyens préparés à l'avance pour l'évacuation de la vapeur d'expansion. La secousse imprimée par un phénomène aussi brusque à toute une batterie de chaudières déjà placée près de la limite d'instabilité qui constitue le danger, pourrait provoquer un dénouement fatal. En outre, un simple incident aussi facile ordinairement à faire rentrer dans l'ordre qu'une montée de pression, se trouve ici amener le désarmement complet de la chaudière et la mise en chômage de l'atelier. Il faut ensuite attendre que le générateur soit refroidi, pour pouvoir replacer la soupape, remplir de nouveau la chaudière, et la remettre en marche. On risque, dans l'intervalle pendant lequel le métal n'est plus protégé par le contact du liquide sans que la température soit encore amortie, de voir la tôle recevoir un coup de feu.

Quant au bénéfice sur lequel comptait l'inventeur, à savoir un dégagement beaucoup plus rapide de la puissance dynamique devenue dangereuse, il semble reposer sur une illusion. En effet la vaporisation de l'eau à l'émergence commencerait à s'effectuer dans l'orifice même, en ralentissant beaucoup le débit, que l'on aurait peut-être évalué dans les prévisions comme celui d'un liquide ordinaire. D'un autre côté, la température n'ayant pas de motifs pour se modifier rapidement dans l'intérieur, l'atmosphère de vapeur qui surmonte le bain liquide conserverait sensiblement, pendant la vidange, sa tension redoutée.

1224 — *Reniflard.* — On a prévu, dans la construction des chaudières à vapeur, le problème inverse de celui des soupapes de sûreté, pour le cas où la force élastique viendrait, dans une fausse manœuvre de vidange, à tomber au-dessous de la tension atmosphérique (¹). A la vérité une telle pression effective serait, en valeur absolue, presque toujours bien moindre que celle qui, en temps ordinaire agit en sens contraire sur l'enveloppe. Cependant, pour des chaudières à basse pression, on peut redouter de placer le corps cylindrique sous l'influence d'un effort s'exerçant de dehors en dedans.

C'est sous l'empire de cette préoccupation, que l'on a quelquefois installé un *reniflard*, c'est-à-dire une soupape s'ouvrant de l'extérieur vers l'intérieur, de manière à permettre au moment opportun la rentrée de l'air.

§ 6

CHEVILLES FUSIBLES

1225 — C'est vers 1831 que Frimot, ingénieur en chef des ponts et chaussées, proposa l'emploi des rondelles fusibles (²). L'attention

(¹) Muller et Roger. *Revue technique de l'Exposition de* 1889, 6ᵉ partie, t. I, p. 331. — W. Rankine. *Manuel de la machine à vapeur*, traduction Richard, p. 479.

(²) Frimot. *Bulletin de la Société d'encouragement*, 1831, p. 532. — Recherches sur les plaques fusibles. *Le Denis Papin*, novembre 1889, p. 3. — Bouchons fusibles. *Comptes rendus mensuels des séances de la Société de l'industrie minérale de Saint-*

était alors portée vers des alliages dont on parvenait à déterminer, pour ainsi dire à volonté, les points de liquéfaction, en associant, dans des proportions convenables, l'étain, le plomb et le bismuth. On peut juger du degré d'abaissement de la température de fusion d'après le tableau suivant, dont les trois dernières colonnes présentent, comme points de comparaison, la fusion de ces trois métaux simples (¹) :

MÉTAUX	N° 1	N° 2	N° 3	N° 4	N° 5	»	»	»
Étain.	3	4	1	3	2	1	—	—
Plomb	5	1	—	2	—	—	—	1
Bismuth	8	5	1	—	1	—	1	—
Tempér^re de fusion.	98	119	141	167	219	230	256	334

Il était dès lors naturel de concevoir la pensée d'ouvrir ainsi spontanément la chaudière par le seul jeu des températures, dès qu'elle atteint la pression limite que l'on ne doit pas dépasser (²).

On se trouvait de même garanti contre les conséquences de l'abaissement du niveau de l'eau au-dessous de la ligne des carneaux. Il suffisait pour cela d'installer à ce niveau une plaque, dont la fusion se fût produite dès que la tôle se serait trouvée surchauffée, en raison de l'absence d'eau sur sa face opposée.

1226 — Malheureusement divers obstacles sont venus s'opposer à la réussite de ce procédé.

Étienne, 1881, p. 127. — Péclet. *Traité de la chaleur*, t. II, p. 67. — Mazzotto. *Sur les chaleurs d'échauffement et de fusion des alliages facilement fusibles*, in-8°, Turin, 1882. — Bour. *Chronique industrielle*, 10 avril 1889, p. 178. — Delaunay. *Étude sur les générateurs à haute pression*, in-8°, p. 62.

Avertisseurs en alliage fusible : Bailey. *American machinist*, 31 mars 1888, p. 1. — Rosenkrantz. *Dingler's polytecknisches Journal*, t. CCLXIV, 1re livraison. — Uebermuhlen. *Revue industrielle*, 25 août 1887, p. 335. — Witscher. *Ibidem*, 10 janvier 1883, p. 16.

(¹) Rankine. *Manuel de la machine à vapeur*, traduction G. Richard, p. 231.

(²) On a même proposé, pour limiter la pression, l'emploi de plaques dont la résistance était déterminée en vue de rompre à ce point. Cette solution n'offrait que des inconvénients, sans aucun avantage.

Avant tout la chaudière se trouvait par là complètement désemparée, tout travail interrompu, et la mise en réparation rendue nécessaire.

En second lieu, le principe lui-même s'est trouvé défectueux, l'expérience ayant montré que ces alliages n'avaient aucune fixité. Même dans des conditions ordinaires, et plus rapidement encore avec les variations de température qui provoquent des déplacements moléculaires, il s'y opère des liquations, des cristallisations de composés divers, qui se rapprochent du caractère des combinaisons en proportions définies, et non plus arbitraires. Le point de fusion de l'ensemble se trouve par là complètement modifié; toute sécurité disparaît, et l'on se trouve en face de l'inconnu.

1227 — Il a donc fallu abandonner les anciennes *rondelles fusibles*, qui présentaient des dimensions notables en surface, et une épaisseur de 15 millimètres soutenue par un grillage en fer.

On a essayé de leur substituer des *bouchons fusibles*, fondant à une température plus élevée que celle de la vapeur, et destinés uniquement à prévenir de l'abaissement du plan d'eau, ou à préserver contre les coups de feu le ciel du foyer des locomotives. Mais on a encore été forcé d'en rabattre, à cause des inconvénients du jet d'eau bouillante destiné à éteindre le feu, et parce qu'il n'est pas possible de remplacer ces bouchons en marche.

Avec ce dispositif, un boisseau de bronze est vissé à poste fixe sur la tôle de coup de feu. L'alliage occupe l'intervalle compris entre le boisseau et un cône intérieur. Ce dernier présente un rebord protecteur, destiné à empêcher les gaz d'attaquer directement le métal fusible, et à retenir un peu celui-ci en place. Sans cela, un commencement de fusion donnerait lieu à une fuite, qui aurait pour résultat de rafraîchir ce cône et d'arrêter la liquéfaction. Il faut au contraire obtenir une coulée complète, pour que le cône lui-même se détache, en déterminant un jet capable d'éteindre le foyer. Lorsque cette éventualité se présente, on met bas le feu, et on laisse refroidir. S'il reste un peu d'alliage,

on le fond à l'aide d'un fer rouge pour achever de dégager le boisseau. Celui-ci doit être entièrement refroidi avant de recevoir le nouveau cône.

On se sert actuellement de *chevilles fusibles*, qui n'ont plus que 3 à 4 millimètres, et sont faciles à remplacer en marche, surtout dans les chaudières inexplosibles. En effet elles ne fondent que si le liquide a disparu de leur face postérieure, et ne donnent lieu dès lors qu'à un sifflement de vapeur et non à un jet d'eau bouillante. En outre la température de la surchauffe étant moins nettement déterminée, l'on se trouve dispensé d'obtenir une aussi grande rigueur dans la stabilité de l'alliage.

CHAPITRE LXIV

CONDENSEUR

—

§ 1

CONDENSEUR DE SURFACE

1228 — *Généralités.* — Nous avons déjà rappelé (p. 525) que la machine à vapeur n'est que l'intermédiaire entre une source chaude et une source froide. La première, sous le nom de chaudière, nous a occupés pendant les onze chapitres qui précèdent. Nous consacrerons celui-ci à l'étude de la source froide, ou *condenseur*.

Ce nom est plus spécialement réservé à l'appareil de *condensation artificielle* que renferment les *machines à condensation*. Mais dans un grand nombre de cas, la source froide ne réclame pour sa réalisation aucun organe spécial. Elle se réduit alors à l'atmosphère terrestre, dans laquelle vient se déverser librement la vapeur de l'échappement. C'est le cas des *machines sans condensation*, que l'on appelle aussi, bien que d'une manière moins claire : *machines à haute pression*.

C'est le *principe de la paroi froide* qui intervient pour cette opération. La vapeur ne peut maintenir dans toute l'étendue de l'enceinte qui lui est offerte que la tension correspondant à la plus faible des températures des divers points. En effet, l'élément le plus froid opère immédiatement la condensation du fluide qui le touche, jusqu'au degré de tension qui correspond à sa propre température; puis le degré de vide ainsi produit détermine

un afflux de vapeur des parties avoisinantes, qui vient subir le même sort tant que la température ne change pas en ce point; ce qui suppose d'ailleurs, ou une masse immense comme celle de l'atmosphère, ou des moyens artificiels de rafraîchissement, pour lutter contre l'influence des calories que la condensation remet en liberté.

On comprend donc qu'il en sera ainsi pour toute détente incomplète, que l'on n'a pas poussée jusqu'à la pression du condenseur, tant que, à partir de l'ouverture de l'échappement, la tension de la vapeur n'aura pas atteint celle de cet organe. Il n'y a plus ensuite de motif pour le transport du reste du fluide, du cylindre au réfrigérant; mais, dans son mouvement rétrograde, le piston achève d'y refouler la vapeur raréfiée.

1229 — Quand on dispose d'eau froide en quantité suffisante [1], on peut abaisser la contre-pression notablement au-dessous de celle de l'atmosphère, et bénéficier ainsi d'une partie importante de l'échelle des tensions. Nous avons vu [2] à quel point on améliore par là le rendement du moteur. Ce perfectionnement, toujours utile, est surtout indiqué pour les moteurs à basse pression, où son importance *proportionnelle* acquiert plus de valeur. Aussi rencontre-t-on ces dernières presque uniquement dans les conditions pour lesquelles l'eau se trouve à discrétion, c'est-à-dire dans la marine. Par contre certaines catégories de machines, telles que les locomotives et les locomobiles, excluent *a priori* le matériel encombrant qui est inhérent à la condensation artificielle.

L'emploi de l'eau froide pour activer la condensation de la vapeur peut s'effectuer de deux manières très différentes : par mélange immédiat, ou par influence indirecte à travers une paroi conductrice séparant les deux fluides. Nous nous occuperons tout d'abord de ce dernier mode, qui se rattache étroitement aux considérations déjà envisagées pour l'échange de chaleur dans le sens inverse, à savoir la production de la vapeur par les chaudières.

[1] Nous verrons plus loin (n° 1236) que cette quantité est considérable.
[2] Voy. t. I, p. 816.

1230 — *Condenseur de surface.* — On appelle *condenseurs secs*, ou *condenseurs de surface* (¹), ceux dans lesquels on évite le contact de l'eau distillée provenant de la condensation de la vapeur avec le liquide réfrigérant. Cette combinaison se recommande surtout dans la marine, où le refroidissement s'opère nécessairement avec de l'eau de mer, tandis qu'il s'attache un très grand intérêt (²) à recueillir à part l'eau distillée, afin d'alimenter les générateurs avec un liquide exempt de dépôts salins.

La nécessité de ces dispositifs s'impose plus étroitement encore dans les moteurs à vapeurs combinées (³), où les liquides, véhicules de chaleur, doivent conserver leur autonomie dans une enceinte fermée, sans être noyés d'eau, afin de pouvoir resservir indéfiniment, et de ne pas émettre au dehors de vapeurs toxiques.

On a imaginé des *condenseurs mixtes*, dont le jeu commence par un système de surfaces réfrigérantes, et se complète par une injection d'eau froide. On attend de ces appareils une température plus élevée pour l'eau d'alimentation, que l'on recueille à part; mais leur efficacité a été contestée (⁴).

1231 — Il y a lieu de penser que l'action des condenseurs de surface est rapide, d'après ce que nous avons vu (p. 45) de l'influence des parois métalliques. Cependant il est prudent de ne pas les associer aux machines à très grande vitesse, et en outre de faire, quand on les emploie, une plus large part à l'avance à l'échappement.

On indique le chiffre de 2 mètres carrés par puissance de

(¹) Audenet. Étude sur les condenseurs de surface. *Revue maritime et coloniale*, mai 1874. — Sédillot. *Condenseurs de surface*, 1863, in-8°. — Barreau. *Condenseurs de surface*, in-8°, Amiens, 1874. — Guédon. Application nouvelle des condenseurs de surface. *Bulletin technologique de la Société des anciens Élèves des Écoles d'arts et métiers*, mai 1888. — Nickol. Expériences sur les condenseurs de surface. *Engineering*, 10 décembre 1875. — Ledieu. *Nouvelles machines marines*, t. II, p. 395 à 475. — Zeuner. *Théorie mécanique de la chaleur*. Traduction Cazin et Arnthal, p. 380. — Bienaymé. *Les machines marines*, p. 270. — *Revue technique de l'Exposition de* 1889, 6ᵉ partie, t. I, p. 364. — Composition condensers for the U.-S. Cruiser *Maine*. *American machinist*, 9 avril 1891, p. 11.

(²) Sous réserve de ce que nous avons dit de l'action des corps gras (p. 738).

(³) Voy. t. I, p. 841.

(⁴) Sauvage. *Annales des mines*, novembre-décembre 1890, p. 542.

cheval. Mais il est plus rationnel de rattacher la superficie du condenseur à la surface de chauffe, qui est un élément de même nature, et qui a servi à former la vapeur à condenser. On adopte pour le rapport des surfaces du condenseur et du générateur, des nombres variant de 0,55 à 0,90. C'est souvent le coefficient $\frac{3}{4}$ pour les moteurs terrestres. A la mer, on diminue la surface en forçant la vitesse de circulation.

Des expériences de Nickol (¹) ont montré que la puissance de condensation varie comme la racine cubique du poids d'eau que l'on fait intervenir. Il en faut au moins 40 kilogrammes pour 1 kilogramme de vapeur à condenser, et l'on arrive même à 60 kilogrammes dans les mers chaudes.

1232 — Il y a lieu d'employer des parois minces et très conductrices, bien décapées par des lavages au carbonate de soude, ou par des jets de vapeur. La question de la meilleure utilisation de ces surfaces pour le refroidissement ne diffère pas au fond de celle de l'échauffement; c'est toujours l'échange de chaleur, du fluide le plus chaud au plus froid. Il est donc naturel de reprendre, pour l'objet actuel, la solution que nous avons alors trouvée la plus efficace, à savoir le type tubulaire (fig. 754, 755).

On construit d'après cela une masse tubulaire, que l'on place, si rien ne s'y oppose, verticalement, afin que l'eau déposée par la vapeur sur les surfaces s'écoule directement en raison de son poids (²). La vapeur arrive par le haut; mais il n'y a pas de solu-

(¹) *Engineering*, 10 décembre 1875. — Rankine. *Manuel de la machine à vapeur*, traduction Richard, p. 621.

(²) Condenseurs à surface : Benson. *Scientific american*, 4 septembre 1886, p. 148. — Brown. *Revue industrielle*, 1881, p. 145. — Caird. Ledieu. *Nouvelles machines marines*, t. II, p. 413. — Danet. *Engineering*, 1876, p. 34. — Fraser (*Revue industrielle*, 24 janvier 1883, p. 55. — *Annales industrielles*, 1883, t. I, p. 397). — Humphrys. Bienaymé. *Les machines marines*, p. 300. — Joessel. *Ibidem*, p. 304. — Kirkaldy. *The Engineer*, 1885, p. 432. — Maudslay. Ledieu. *Nouvelles machines marines*, t. II, p. 406. — Mignon et Rouart (*Revue industrielle*, 1880, p. 293. — *Portefeuille économique des machines*, 1881, p. 71. — *Comptes rendus mensuels des séances de la Société de l'industrie minérale de Saint-Étienne*, décembre 1880, p. 293). — Nickol. Rankine. *Manuel de la machine à vapeur*, traduction Richard, p. 621. — Penn. Bienaymé. *Les machines marines*, p. 300. — Perkins. Ledieu. *Les nouvelles machines marines*, t. II, p. 415.

tion fixe pour l'admettre à l'intérieur plutôt qu'à l'extérieur

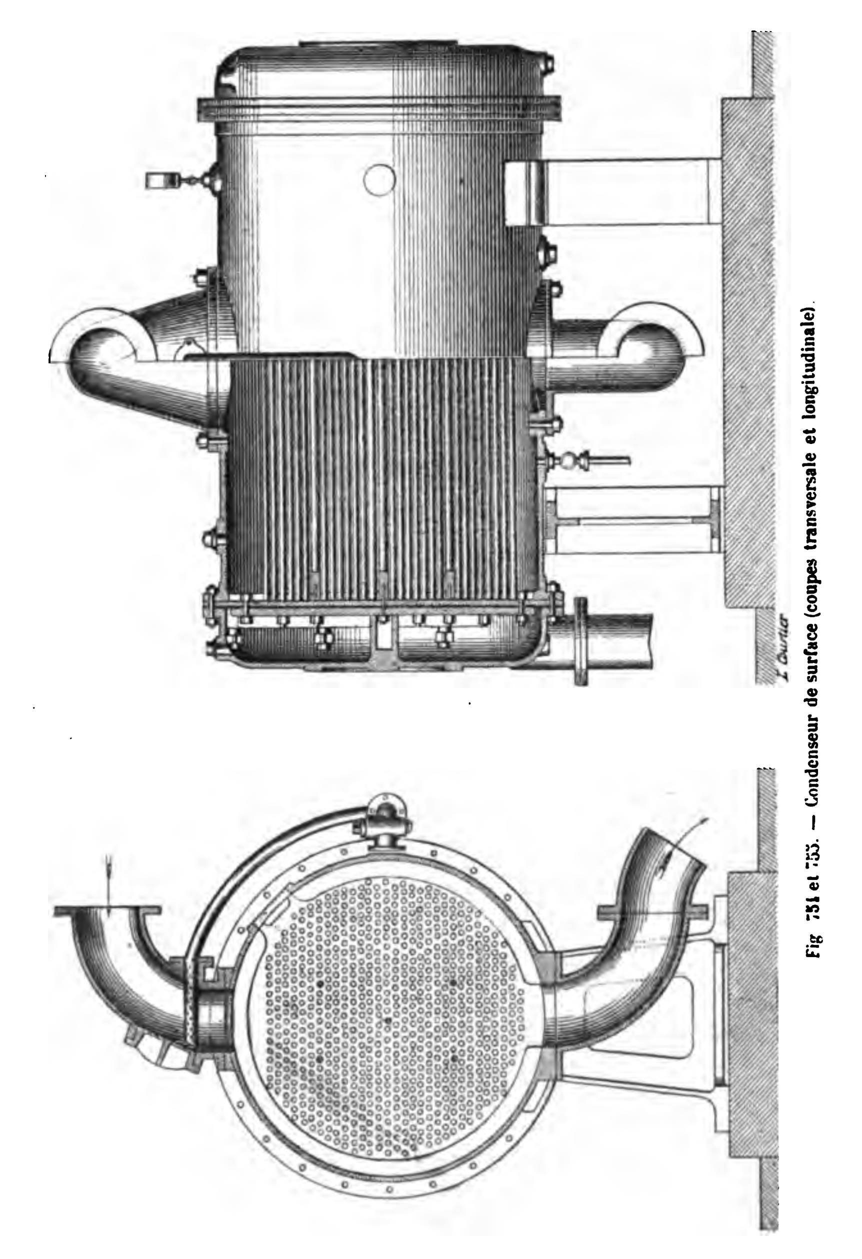
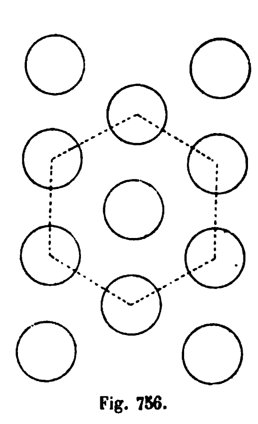


Fig 751 et 753. — Condenseur de surface (coupes transversale et longitudinale).

des tubes. En France, on engage de préférence l'eau dans les tubes,

afin de mieux guider son mouvement; et pourtant, il serait plus rationnel de la faire agir sur leur surface externe qui est la plus grande, attendu que la conduction de la chaleur est plus facile de la vapeur au métal, qu'entre celui-ci et l'eau.


Fig. 756.

Le liquide est poussé par une *pompe de circulation*, à piston ou à force centrifuge. Quelquefois la pompe à air, dont nous parlerons bientôt, remplit également cette fonction. C'est le moteur principal qui met cet engin en action; cependant on y affecte parfois un petit cheval spécial. On a également proposé d'utiliser pour cet effet le *filage* relatif du navire. Mais on ne resterait plus alors maître de l'opération, et il n'y aurait pas moyen de l'exécuter une fois que l'on aurait stoppé.

Les tubes ont un diamètre de 15 à 20 millimètres, une épaisseur de 1 millimètre à 1 millimètre et demi, une distance mutuelle de 30 millimètres d'axe en axe [1]. La section totale offerte à la vapeur doit être égale à celle du tuyau d'échappement, c'est-à-dire $\frac{1}{16}$ du piston moteur. On s'attache à la disposer de manière que la

[1] Cherchons à déterminer le rapport des volumes offerts aux deux fluides, en les appelant, pour bien fixer le langage : volume tubulaire et volume extérieur.

On peut concevoir la section droite comme entièrement remplie d'hexagones de côté D, (fig. 756). Dans chacun d'eux, l'espace *tubulaire* occupe un cercle central de diamètre d, plus six fois un tiers de cercle, soit en tout trois cercles, ou :

$$\frac{3\pi d^2}{4}.$$

Comme l'hexagone a de son côté pour surface :

$$6.\frac{1}{2}D\sqrt{D^2-\frac{D^2}{4}}=\frac{3\sqrt{3}}{2}D^2,$$

l'espace *extérieur* est formé de la différence :

$$\frac{3\sqrt{3}}{2}D^2-\frac{3\pi}{4}d^2.$$

Le rapport m des espaces extérieur et tubulaire est donc, en appelant n celui de

vitesse soit la même dans tous les tubes, sans quoi le refroidissement s'y opérerait d'une manière inégale.

Les plaques tubulaires sont en fonte, pour des tubes de bronze ; ou en bronze, lorsque ceux-ci sont en cuivre. On se sert d'emboîtements coniques, avec des bagues de bois tendre, qui se gonflent dans l'humidité et assurent l'étanchéité. Certains joints se font aussi en caoutchouc.

1233 — *Aéro-condenseur.* — Quand on ne dispose pas de la quantité d'eau nécessaire, il reste la ressource d'employer l'air comme réfrigérant [1].

Dans l'aéro-condenseur Fouché [2], la vapeur circule à travers un faisceau tubulaire (fig. 757), sur lequel un ventilateur lance un fort courant d'air, en même temps qu'on laisse couler un peu d'eau sur les surfaces, afin que son évaporation procure de la fraîcheur.

la distance d'axe en axe au diamètre :

$$m = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} n^2 - 1 = 1{,}1 n^2 - 1. \tag{1}$$

On tire de là inversement :

$$n = \sqrt{\frac{(m+1)\pi}{2\sqrt{3}}} = 0{,}95\sqrt{m+1}. \tag{2}$$

Par exemple, avec des tubes de 2 centimètres, espacés de 3 centimètres, la formule (1) donne :

$$m = 1{,}46.$$

Si l'on veut réaliser pour l'extérieur un volume double de l'espace tubulaire : $m = 2$, la formule (2) indique la valeur :

$$n = 1{,}65.$$

Si l'on demandait que le rapport de ces volumes fût le même que celui des dimensions en question, il faudrait prendre :

$$m = n = \frac{\pi}{4\sqrt{3}}\left(1 + \sqrt{1 + \frac{8\sqrt{3}}{\pi}}\right) = 1{,}51\,;$$

c'est-à-dire sensiblement le rapport de 3 à 2. Le côté de l'hexagone serait alors égal à 3 rayons, et l'intervalle extérieur des tubes égal à un rayon.

(1) Nézeraux. *Annales du Conservatoire*, 16 août 1868. — Olivier. *Neuvième Congrès des Ingénieurs en chef des Associations de Propriétaires d'appareils à vapeur*, p. 100.

(2) *Génie civil*, t. VII, p. 136. — *Revue technique de l'Exposition de* 1889, 6e partie, t. II, p. 189. — *Engineering*, 1889, t. II, p. 246.

L'appareil peut être utilisé en hiver pour le chauffage de l'atelier. L'inventeur annonce un vide de 50 à 60 millimètres, pour un roulement de 100 kilogrammes de vapeur, 30 mètres

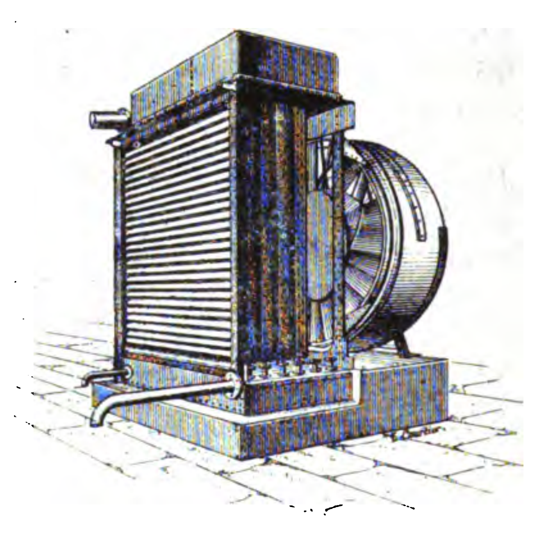


Fig. 757. — Aéro-condenseur Fouché (vue perspective).

carrés de surface, et une consommation de puissance d'un demi-cheval.

Dans le système Craddock, le refroidissement s'obtient au moyen d'un violent courant d'air *relatif*, que l'on réalise en imprimant une rotation rapide au faisceau tubulaire.

§ 2

CONDENSEUR A INJECTION

1234 — *Description.* — Le *condenseur à injection* ([1]) est une

([1]) Cousté. Étude sur la condensation dans les machines à vapeur. *Annales des mines* 6e série, t. XIV, p. 123. — Horsin-Déon (Étude sur les appareils de condensation. *Mémoires de la Société des Ingénieurs civils*, novembre 1887. — Haton de la Goupillière. *Revue des travaux scientifiques*, t. VIII, p. 219). — Dwelshauvers-Dery (*Étude calorimétrique de la machine à vapeur*, aide-mémoire Léauté. — Note sur la théorie des condenseurs. *Revue universelle des mines et des usines*, 1889). — Aimé Witz. *La*

capacité de forme quelconque, telle qu'une caisse métallique renforcée par des nervures à l'intérieur, ou un cylindre de fonte

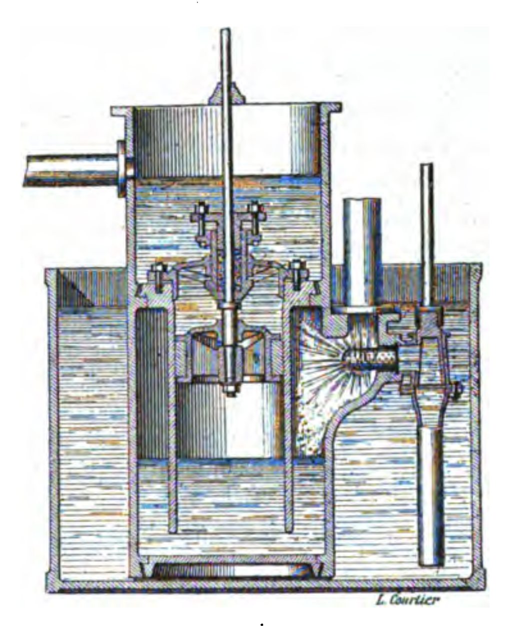


Fig. 758. — Condenseur et pompe à air (coupe verticale).

(fig. 758). On l'immerge dans la *bâche à eau froide*, pour éviter les rentrées d'air par les joints. Le condenseur de Watt [1] avait un

machine à vapeur, in-12, 1891, p. 165. — Sauvage. *Annales des mines*, 8e série, t. XVII, p. 539. — Haton de la Goupillière. *Ibidem*, juillet-août 1879, p. 177. — Callon. *Cours de machines*, t. II, p. 148, 252. — Wiedmann. *Étude des principes de la construction des machines marines*, p. 103. — Bienaymé. *Les machines marines*, p. 270. — Schmidt. Inutilité de la condensation. *Revue universelle des mines et de la métallurgie*, 2e série, t. XII, p. 179. — Burgh. *On condensation of steam*. — Rankine. *Manuel de la machine à vapeur*. Traduction Richard, p. 534, 735. — *American machinist*, 24 septembre 1881, p. 7; 31 décembre 1881, p. 1. — Weiss. *Zeitschrift des Vereins deutscher Ingenieure*, 1888, p. 9; 1889, p. 768.

[1] Condenseurs à injection : Berger André. *Annales des mines*, novembre-décembre 1890, p. 505. — Conover. *American machinist*, 24 octobre 1889, p. 4. — Frikart. *Annales des mines*, novembre-décembre 1890, p. 505. — Johnson et Allan. *The Engineer*, 22 octobre 1875, p. 282. — Kirkaly. *Scientific american supplement*, 16 mars 1889, p. 11000. — De Quillacq. *Annales des mines*, novembre-décembre 1890, p. 505. — Reid. *Scientific american*, 13 avril 1889, p. 232. — Row. *Engineering*, 27 novembre 1891, p. 638. — Weiss. *Annales des mines*, novembre-décembre 1890, p. 544. — Worthington (fig. 760). *American machinist*, 5 janvier 1884, p. 1; 27 avril 1890, p. 1.

volume égal à $\frac{1}{8}$ de celui du cylindre moteur. Aujourd'hui l'on est arrivé à doubler, et même à quadrupler cette proportion. Dans la marine, le volume du condenseur dépasse parfois d'un tiers celui du cylindre. Il y a en effet intérêt à ce que l'espace soit assez grand pour que la pression ne se trouve pas trop influencée par le dégagement de l'air que l'eau avait dissous dans les conditions atmosphériques, et qui ne rencontre plus ici une tension capable de le maintenir en dissolution. Un engin spécial, dont nous parlerons bientôt sous le nom de *pompe à air*, est destiné à entraîner ce gaz en même temps que l'eau chaude, au fur et à mesure de leur production.

Un orifice amène la vapeur d'échappement, à laquelle on laisse toujours, en fin de détente, un certain excédent de pression sur celle qui règne dans le condenseur. Un robinet réglé à la main fournit l'eau de la bâche, laquelle entre d'elle-même, en raison de l'excès de la pression atmosphérique sur la tension intérieure. La section d'admission est ordinairement égale à $\frac{1}{250}$ de celle du piston. Il est d'ailleurs facile de la déterminer théoriquement, connaissant le coefficient 0,62 de contraction, la charge motrice équivalente au *degré de vide intérieur*, et le débit à fournir, dont nous calculerons dans un instant la valeur.

Cette valve est munie d'un appendice destiné à épanouir le jet en nappe mince, ou en gerbe jaillissante, afin d'augmenter l'instantanéité du contact de l'eau et de la vapeur. M. Du Fay a proposé l'emploi d'ajutages coniques lançant des jets les uns contre les autres, de manière à les pulvériser en nuage fin.

1235 — *Condenseur à eau récupérée.* — Lorsqu'on ne dispose que d'une quantité d'eau insuffisante, il reste cependant possible de pratiquer la condensation, au prix d'installations spéciales, qui permettent de refroidir rapidement le liquide, de manière à pouvoir le repasser dans l'appareil, qui prend alors le nom de *condenseur à eau récupérée* (1).

(1) Condenseurs à eau récupérée : Brunon (*Portefeuille économique des machines*, 1880, pl. 5. — *Comptes rendus mensuels des séances de la Société de l'industrie miné-*

A cet effet, on fait couler l'eau sur des fascines étagées, comme dans les bâtiments de graduation des salines, ou sur des

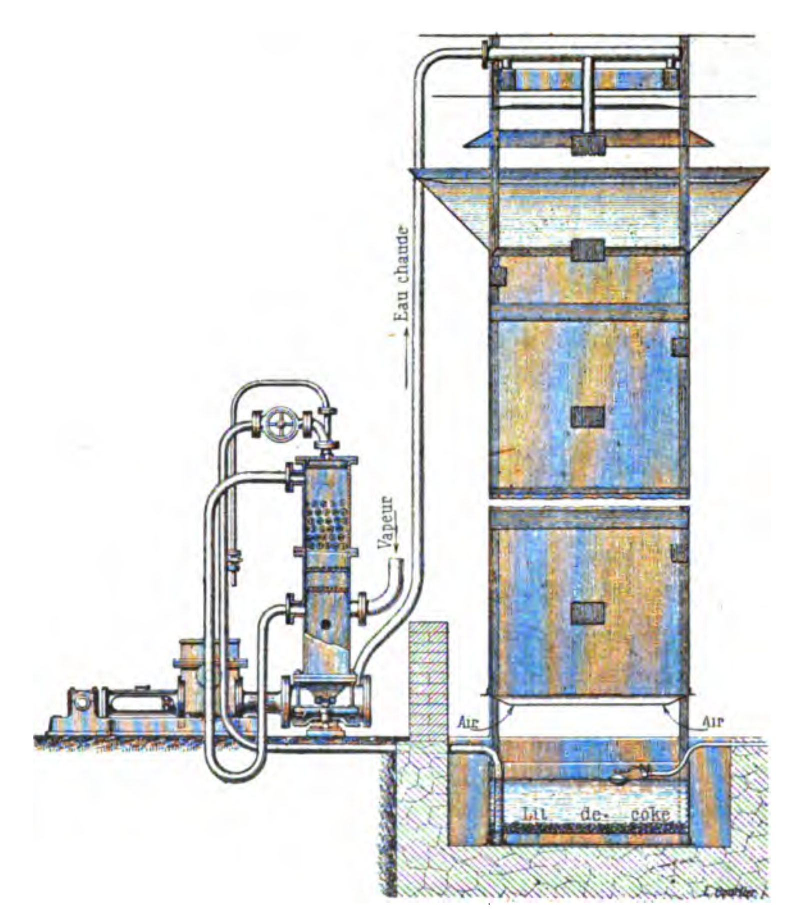


Fig. 759. — Condenseur Grangé à eau récupérée (élévation).

tôles perforées. Cependant, comme la buée qui s'en dégage est très gênante pour le voisinage, il est préférable d'employer l'action d'un ventilateur dans un espace fermé, avec cheminée de dégagement.

rale de Saint-Étienne, avril 1877, p. 82). — Challigny et Guyot-Sionnest (Hirsch. *Bulletin de la Société d'Encouragement*, 5e série, t. III, p. 454. — *Portefeuille économique des machines*, 3e série, t. XI, p. 66). — Velner. Refroidissement artificiel des eaux de condensation (*Mémoires de la Société des Ingénieurs civils*, novembre 1884, p. 507. — *Œsterreichische Zeitschrift*, 1884).

Avec l'appareil Grangé (1), le tirage naturel suffit à travers un château d'eau de quelques mètres de haut (fig. 759), dans lequel descend l'eau tiède sur un système de chicanes. Le liquide refroidi se dépouille des graisses à la partie inférieure, en traversant un lit de coke. Le condenseur est desservi par deux pompes, qui se répartissent avec plus de netteté les deux fonctions fondamentales de la pompe à air, destinée à évacuer à la fois l'eau et l'air. Une pompe à air proprement dite puise dans la partie supérieure, vers laquelle son action détermine un mouvement ascensionnel. Elle n'enlève que l'air, avec très peu d'eau. Une seconde pompe extrait l'eau dans la région inférieure. On obtient ainsi une circulation méthodique des fluides, et une répartition graduée des températures, de telle sorte que le condenseur, froid à la main à sa partie supérieure, atteint dans le bas la température de 60°.

1236 — *Évaluation de l'eau de réfrigération.* — Nous pouvons facilement déterminer le rapport théorique de l'eau de réfrigération à celle qui résulte de la condensation de la vapeur (2).

L'appareil étant envisagé dans un état de régime régulier, nous présenterons le raisonnement pour 1 kilogramme de la vapeur qui parvient en réalité au condenseur, en y comprenant, outre le fluide spécialement moteur, celui qui, par le jeu de l'influence des parois (p. 45), s'était momentanément déposé sous la forme de rosée liquide, pour se volatiliser de nouveau en reprenant dans le métal la chaleur qu'il y avait momentanément mise en dépôt.

Désignons par P le poids d'eau froide nécessaire pour en opérer la condensation, à la température θ' qui règne dans cette enceinte. Le liquide possède, par unité de poids, la chaleur interne μr au-dessus de celle qu'il renfermerait à la température zéro (3). Le

(1) Hirsch. *Bulletin de la Société d'Encouragement*, 4e série, t. V, p. 353. — *Annales industrielles*, 18 août 1889, p. 194. — *Journal des usines à gaz*, 20 février 1889, p. 69.

(2) Dwelshauvers Dery. Théorie du condenseur. *Revue universelle des mines et de la métallurgie*, 3e série, t. V, p. 225. — De Somer. Théorie du condenseur, d'après les expériences de Hirn. *Génie civil*, t. XVIII, p. 152. — Madamet. *Thermodynamique*. p. 149. — Bienaymé. *Les machines marines*, p. 270. — Zeuner. *Théorie mécanique de la chaleur*. Traduction Cazin et Arnthal, p. 380. — Callon. *Cours de machines*, t II, p. 253.

(3) Voy. t. I, p. 775.

poids de l'ensemble P + 1 contient donc la quantité de chaleur :

$$(P + 1)\mu_{1}.$$

C'est elle qui sort du condenseur avec cette eau. Nous devons donc égaler à sa valeur la résultante des appoints que reçoit cette enceinte, sous diverses formes qu'il nous faut énumérer avec soin.

1237 — Nous avons à distinguer à cet égard : 1° les actions de surface, 2° les actions de masse.

En ce qui concerne les actions de surface, on en peut indiquer deux : 1° la perte effectuée en raison de la conductibilité et du rayonnement de l'enveloppe du condenseur, laquelle peut être ici considérée comme tout à fait négligeable en pratique ; 2° le transport de chaleur qui a été désigné par Hirn sous le nom de refroidissement au condenseur, et dont nous nous sommes longuement occupés ci-dessus (p. 53). Mais nous ne le mentionnons ici que pour mémoire, car c'est une action exercée par la surface du cylindre, et non pas du condenseur, et le poids de l'eau qui lui sert de véhicule vient d'être expressément compris dans celui de la vapeur à condenser. Dans des conditions défectueuses de marche, cette quantité peut devenir considérable. Mais nous nous attacherons de préférence, comme on le verra plus loin, au cas de la réalisation du desideratum théorique : la vapeur sèche en fin de détente (p. 50). Alors disparaît la revolatilisation qui est l'agent essentiel de ce transport de chaleur.

Quant aux actions du second genre, la masse à considérer arrive à la fois : 1° du cylindre moteur, 2° de la bâche à eau froide. En outre, chacune de ces deux provenances introduit de l'énergie pour trois motifs distincts : 1° la chaleur interne déjà possédée par le corps (évaluée à partir de la même origine que ci-dessus) ; 2° la chaleur équivalente au travail de refoulement de la pression p' qui règne dans le condenseur ; 3° le calorique correspondant à l'extinction de la force vive avec laquelle les fluides se sont précipités dans le condenseur, laquelle s'y perd par l'action du frottement et des tourbillonnements.

Envisageons d'abord les P kilogrammes d'eau froide. En appelant θ'' la température de la source à laquelle on les puise, nous aurons ce premier terme relatif à la chaleur interne :

$$P\mu_{\theta''}.$$

En second lieu, l'introduction de P litres, c'est-à-dire de $\frac{P}{1000}$ mètres cubes, s'effectue malgré la pression antagoniste p' de l'atmosphère raréfiée, d'où la nécessité d'une fourniture de travail pour le refoulement de cette dernière. Elle s'y retrouvera en calories, avec la valeur :

$$\frac{1}{E}\cdot\frac{P}{1\,000}p'.$$

Il reste enfin la demi-force vive acquise pendant cette introduction, pour disparaître ensuite en frottements. Elle a été créée par le travail de l'excès de la pression atmosphérique p_a sur la tension intérieure p'; et comme le volume engendré sous cette influence constante $p_a - p'$ est $\frac{P}{1000}$, ce travail, numériquement égal à la demi-force vive en question, représente en calories le terme :

$$\frac{1}{E}\cdot\frac{P}{1\,000}(p_a - p').$$

L'ensemble de ces trois expressions nous donne par conséquent, pour l'eau froide :

$$P\left(\mu_{\theta''} + \frac{1}{E}\frac{1}{1\,000}p_a\right),$$

c'est-à-dire :

$$P\left(\mu_{\theta''} + \frac{10\,336}{424 \times 1\,000}\right),$$

ou enfin :

$$P(\mu_{\theta''} + 0{,}02431).$$

Envisageons d'autre part le kilogramme de vapeur détendue à la

température finale θ [1], que l'échappement met en communication avec le condenseur. On y peut distinguer un poids m de vapeur, associé avec la quantité $1 - m$ d'eau liquide. Nous aurons par suite comme énergie calorifique interne :

$$\mu_1 + m\rho_1.$$

En second lieu, ce corps doit refouler l'atmosphère raréfiée, de tension p', pour y loger son propre volume mu_1 (car on peut négliger le volume spécial au liquide). De là un travail qui a pour équivalent le nombre de calories :

$$\frac{1}{E} \cdot mu_1 . p'.$$

Quant à la force vive avec laquelle la vapeur se précipite dans l'enceinte, il n'y aurait pas lieu d'en tenir compte dans l'hypothèse de la détente complète, qui laisse la vapeur exactement à la pression du condenseur. Il ne se produirait en effet alors aucune tendance spontanée au mouvement, et celui-ci ne serait communiqué que par le retour du piston balayant le cylindre. Nous n'envisagerons donc ici ce terme que pour mémoire. L'ensemble nous donne dans ces conditions, pour le kilogramme de vapeur :

$$\mu_1 + m\rho_1 + \frac{mu_1 p'}{E}.$$

1238 — Nous pouvons maintenant poser l'équation :

$$(P + 1)\mu_1' = P(\mu_1'' + 0{,}024) + \left(\mu_1 + m\rho_1 + \frac{mu_1 p'}{E}\right),$$

d'où se dégage la valeur cherchée :

$$P = \frac{(\mu_1 - \mu_1') + m\left(\rho_1 + \frac{p'u_1}{E}\right)}{(\mu_1' - \mu_1'') - 0{,}024}.$$

(1) Ce symbole représente, d'après l'échelle thermométrique usuelle, la température absolue t_2 des théories que nous avons formulées dans la thermodynamique (t. I).

Mais il convient de la simplifier, en restant dans l'ordre d'approximation où nous nous trouvons déjà placés.

Pour cela nous supposerons spécialement la vapeur sèche en fin de détente, c'est-à-dire $m = 1$. Confondons p' avec la pression finale de détente p_1. En fait, celle-ci représente la tension de vapeur qui correspond à une température θ plus élevée que celle θ' du condenseur. Mais en revanche la tension p' de cette enceinte est due tout à la fois à la vapeur et à l'air. On peut donc accepter cette assimilation. Dès lors le trinome :

$$\left(\mu + \rho + \frac{pu}{E}\right)_\theta.$$

se résume dans le symbole λ_θ [1], ce qui permet d'écrire simplement :

$$P = \frac{\lambda_\theta - \theta'}{\theta' - \theta''},$$

en confondant encore la fonction μ avec la température θ [2], et négligeant le terme insignifiant 0,024.

On voit par cette formule que la quantité d'eau froide croît avec la pression, à cause du terme λ, mais très lentement (n° 934). Elle augmente d'une manière bien plus sensible en vertu de l'abaissement de la température θ' que l'on entreprend de réaliser dans le condenseur.

1239 — Il n'y a pas lieu d'ailleurs de trop entreprendre sur ce point, et l'on gagnerait peu à chercher à maintenir l'état thermométrique du condenseur au-dessous de la limite généralement admise 30°. A la vérité l'on affaiblirait par là quelque peu la contre-pression sur le piston, mais comme on n'amène jamais, dans le cycle effectif, la tension du fluide jusqu'à celle du condenseur, on ne réaliserait pas tous les avantages de l'abaissement de cette dernière [3].

(1) Voy. t. I, p. 775, 787.
(2) Voy. t. I, p. 775.
(3) Sauvage. *Annales des mines*, novembre-décembre 1890, p. 540.

Acceptons donc cette valeur $\theta = 40°$, et pour la température de la source $\theta'' = 10°$. Il vient alors :

$$P = \frac{\lambda - 40}{30}.$$

Or λ diffère peu de 620 dans ces conditions (¹). On a donc, tout calcul fait :

$$P = 19,3.$$

Nous pouvons par suite admettre, comme proportion théorique de l'eau froide, 20 fois le poids total de la vapeur. Toutefois il y a place ici pour une certaine majoration, en raison des divers effets que nous avons écartés de ce calcul. Dans la pratique, on emploie souvent 25, et même 30 fois le poids de la vapeur, pour les condenseurs à injection (¹).

§ 3

POMPE A AIR

1240 — *Description.* — Dans les générateurs, la pression étant plus forte que celle de l'atmosphère, la vidange s'opère seule, mais l'alimentation exige une dépense de travail. Pour le condenseur, les conditions sont précisément inverses, la tension étant moindre qu'à l'extérieur. L'introduction de l'eau se fait alors d'elle-même ; mais son extraction nécessite une certaine production de travail par un engin spécial.

On l'appelle *pompe à air*, attendu qu'il s'agit, ainsi que nous l'avons déjà indiqué, d'enlever non seulement le liquide provenant à la fois de la condensation et de l'injection, mais en outre l'air qui se trouvait originairement dissous dans l'eau froide.

Pour ce double motif, cet appareil est beaucoup plus volumineux que la pompe alimentaire, puisqu'à la quantité que celle-ci

(¹) Voy. t. I, p. 777.

a dû fournir à la chaudière, vient s'ajouter ici un poids 20 ou 30 fois plus grand d'eau froide, plus l'air dilaté aussi bien par la non-pression que par l'élévation de température, et plus encore un peu de vapeur. Afin de réduire ce volume, on emploie autant que possible, sans en faire cependant une règle, un appareil à double effet, dont le fonctionnement se trouve d'ailleurs mieux en rapport avec le double effet du moteur lui-même. Lorsqu'elle est au contraire à simple effet, cette pompe possède une capacité égale à $\frac{1}{5}$ ou $\frac{1}{6}$ de celle du cylindre moteur.

1241 — La pompe à air est mue par la machine elle-même. Pour les moteurs à balancier qui sont lents, on prend la commande de la tige de pompe en un point à mouvement rectiligne du parallélogramme articulé [1]. Si la machine fait plus de 20 à 25 tours, il faut souvent établir dans la transmission un ralentissement, car on ne saurait mener vite des fluides. Une vitesse de 3 mètres à $3^m,50$ suffit à cet égard. Cependant on réussit à en activer l'allure par l'emploi de pistons plongeurs à extrémités effilées, et de clapets nombreux et légers.

La pompe à air est ordinairement placée dans une fosse, en contre-bas du moteur, afin de gagner de la place. On la dispose aussi *en tandem* sur la tige du piston moteur, lorsque l'allure de ce dernier est acceptable pour la pompe.

Dans les grands ateliers, où plusieurs moteurs fonctionnent d'une manière indépendante, on trouve souvent avantage à leur affecter un condenseur commun, dont on soustrait la manœuvre à leurs causes d'irrégularités individuelles, en faisant commander sa pompe par un moteur spécial. Cet organisme porte le nom de *machine condensante*, ou *condenseur séparé* (fig. 760).

1242 — La pompe à air présente un *clapet de pied*, par lequel s'introduit l'eau du condenseur. Toutefois dans l'appareil Frikart, il n'y a pas de clapet d'aspiration. Le piston, qui a une épaisseur presque égale à la valeur de sa course, démasque des fentes placées

[1] Haton de la Goupillière *Traité des mécanismes*, p. 197.

au milieu de la longueur des génératrices, et découvertes par suite vers la fin de la course. Elles donnent entrée tout à la fois à l'eau et à l'air.

Des *clapets de refoulement* servent pour l'évacuation dans la

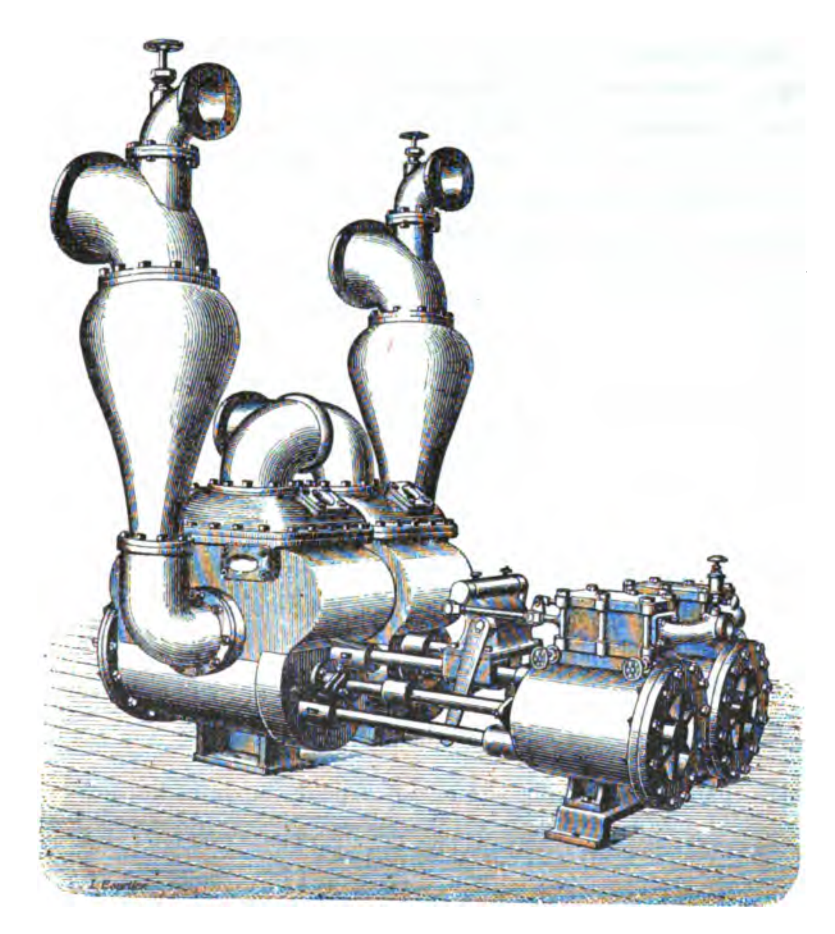


Fig. 760. — Condenseur indépendant Worthington (vue perspective).

bâche à eau chaude. Leur section totale peut atteindre celle du corps de pompe, ou se réduire jusqu'au tiers de cette valeur. On les fait en caoutchouc, de 15 millimètres d'épaisseur, battant sur des grillages de soutien. On emploie également de petits disques métalliques très légers, maintenus par de faibles ressorts.

Dans certains condenseurs (1), on fait figurer une soupape de sûreté, ou *reniflard*, destinée à laisser rentrer l'air en comblant le vide, si celui-ci vient à s'exagérer d'une manière inquiétante, et à faire monter l'eau en menaçant de noyer le moteur. Un flotteur manœuvre alors la soupape en temps utile.

Dans la pompe De Quillacq, les clapets sont placés sous une glace qui en laisse voir le jeu. L'action de ces organes est ordinairement accompagnée de battements, attendu qu'ils ne se soulèvent pas dès le point mort comme pour les appareils hydrauliques, mais doivent auparavant, ainsi que dans les machines à fluides élastiques (2), laisser préparer la tension.

Avec le condenseur Weiss (3), la pompe n'extrait que l'air. L'eau sort d'elle-même à la partie inférieure, par un tube de 10 mètres de hauteur qui plonge dans une bâche, de manière à constituer un véritable baromètre à eau. La pompe *à air seul* extrait ce gaz du point le plus haut de l'appareil, où il se dégage avec son maximum de tension au sortir du liquide, dont l'admission se fait en ce point. Celui-ci descend sur un système de chicanes, pendant que la vapeur monte à sa rencontre. La pression de cette dernière décroît donc de bas en haut. Le refroidissement s'opère d'une manière méthodique, et par suite avec le moins possible d'eau.

1243 — *Calcul des dimensions.* — On peut admettre que ce liquide dissout dans les conditions ordinaires $\frac{1}{15}$ de son volume d'air. Pour chaque kilogramme de vapeur, on introduit dès lors dans le condenseur $\frac{P}{15}$ litres, ou $\frac{1}{1000} \cdot \frac{P}{15}$ mètres cubes d'air atmosphérique (en conservant au symbole P sa signification précédente). Nous raisonnerons comme si cette quantité se dégorgeait toute entière dans l'enceinte, et devait être ensuite évacuée par la pompe.

(1) BRASSEUR, BERGER-ANDRÉ, etc.
(2) Voy. t. I, p. 510.
(3) *Annales des mines*, novembre-décembre 1890, p. 544. — *Zeitschrift des Vereins deutscher Ingenieure*, 1888, p. 9; 1889, p. 768.

Le gaz, entré à 10°, rencontre une température de 40°. Il se dilate donc d'après le rapport des températures absolues, et son volume devient :

$$(1) \qquad \frac{1}{1000} \cdot \frac{P}{15} \cdot \frac{40 + 273}{10 + 273} = 0^{m^3},000\,073 \text{ P}.$$

Une seconde dilatation est provoquée par le passage de la pression atmosphérique à une tension moindre, qu'il nous faut d'abord évaluer. D'après la loi de Dalton, les vapeurs acquièrent en présence des gaz la même tension que dans le vide à la même température. Celle-ci étant de 40°, la tension correspondante est de 747 kilogrammes par mètre carré, d'après les tables de Regnault. On sait en second lieu que la force élastique du mélange est égale à la somme de celles qu'auraient séparément le gaz et la vapeur, si chacun d'eux occupait seul l'espace en question. Admettons comme résultat effectif le *vide au dixième*, c'est-à-dire la pression $p' = 1033$. La différence nous donnera pour l'air :

$$1\,033 - 747 = 286^{kg}.$$

Il s'ensuit comme rapport de dilatation, d'après la loi de Mariotte :

$$\frac{10\,333}{286} = 36,12\,;$$

ce qui porte le volume à :

$$36,12 \times 0,000\,073 \text{ P} = 0,0026 \text{ P}.$$

En adjoignant cette capacité à celle de l'eau 0,001 (P + 1), il vient pour le total à évacuer :

$$0,0036 \text{ P} + 0,001,$$

c'est-à-dire sensiblement le quadruple du volume d'eau froide introduit (¹).

(¹) Il y a lieu dans la réalité de tenir compte de certains effets accessoires. Armen-

Si nous admettons la valeur $P = 30$ (p. 100), le résultat est de 109 litres par kilogramme de vapeur en roulement.

1244 — Désignons actuellement par x le rapport entre les dimensions du corps de la pompe à air et celles du cylindre moteur, en supposant ces deux capacités géométriquement semblables pour fixer les idées, et les deux fonctionnements à double effet. Le rapport des volumes sera x^3. Dans chaque cas on connaîtra la pression en fin de détente, et l'on terminera exactement le calcul que nous ne pouvons achever ici, comme exemple, qu'en faisant une hypothèse spéciale.

Nous adopterons celle de la détente complète, qui nous donnera évidemment un minimum sensiblement inférieur à la réalité. La tension finale de la vapeur étant alors égale à celle du condenseur, qui est d'un dixième d'atmosphère, ou de 1033 kilogrammètres, son volume spécifique [1] a pour valeur $14^{m^3},900$. Nous poserons donc l'égalité :

$$0,109 = x^3 \times 14,900,$$

$$x = \sqrt[3]{\frac{0,109}{14,900}} = 0,194.$$

Si l'on supposait le simple effet, ce résultat deviendrait :

$$x\sqrt[3]{2} = 0,194 \times 1,260 = 0,254.$$

1245 — *Calcul du travail.* — Le poids total d'eau à extraire par kilogramme de vapeur en roulement est $P + 1$, et son volume $\frac{P+1}{1000}$. On le prend à une pression égale à $\frac{1}{10}$ d'atmosphère, et on le rejette dans l'atmosphère elle-même. Le travail nécessaire a par conséquent pour expression :

$$0,9 \times 10\,336 \times \frac{P+1}{1\,000} = 9^{kgm},302\,(P+1).$$

gaud conseille (*Traité des machines à vapeur*, t. II, p. 520) de donner au volume *utilement engendré* par la pompe à air une valeur égale à 8 fois celui de l'eau froide.

(1) Voy. t. I, p. 777.

Quant à l'air, qui se trouve mélangé avec de la vapeur à la tension de 747 kilogrammes, ses pressions extrêmes sont 10 336 — 747 et 1033 — 747. Leur rapport a pour valeur :

$$\frac{10\,336 - 747}{1\,033 - 747} = \frac{9\,589}{286}.$$

Pour évaluer le travail nécessaire à cette compression, il est nécessaire de fixer ici par une hypothèse le mode d'opération. Nous le supposerons isotherme. Dès lors il nous faudra : 1° prendre le logarithme *népérien* de ce rapport [1], qui revient à :

$$2{,}3026 \log \frac{9\,589}{286} = 3{,}508;$$

2° le multiplier par le produit de la pression et du volume correspondant. Si nous employons pour ce calcul la pression atmosphérique 10 336, le volume qu'il y aura lieu de lui associer sera celui qui s'est dégagé de la dissolution sans changement de pression, mais en tenant compte du changement de température, tel en un mot que nous l'avons évalué ci-dessus (1) :

$$0{,}000\,073\ \mathrm{P}.$$

L'expression du travail devient par là :

$$3{,}508 \times 10\,336 \times 0{,}000\,073\ \mathrm{P} = 2{,}647\ \mathrm{P}.$$

En réunissant ces deux termes, on obtient :

$$9{,}302\,(\mathrm{P} + 1) + 2{,}647\ \mathrm{P} = 11{,}949\ \mathrm{P} + 9{,}302.$$

Si nous rendons à P sa valeur 30 (p. 875), il viendra définitivement :

$$367^{\mathrm{kgm}}{,}77.$$

[1] Voy. t. I, p. 411.

On ne doit toutefois voir là qu'un résultat théorique, et il y a encore lieu de tenir compte du rendement de la pompe. En admettant qu'il soit des trois quarts, nous devrons majorer le chiffre précédent d'un tiers de sa valeur, ce qui le porte à :

$$490^{kgm}.$$

Examinons l'influence qu'il exercera sur le rendement final. Nous supposerons pour cela que le moteur fonctionne en brûlant 1 kilogramme de charbon par cheval-heure, c'est-à-dire pour une production de $75 \times 60 \times 60 = 270\,000$ kilogrammètres. Admettons en même temps qu'un kilogramme de combustible volatilise 6 kilogrammes d'eau. Chaque unité de poids de vapeur fournira dans ces conditions :

$$\frac{270\,000}{6\,n} = \frac{45\,000}{n}.$$

Par conséquent la perte proportionnelle due au travail de la pompe à air sera :

$$\frac{490\,n}{45\,000} = 0{,}011\,n.$$

Avec un moteur soigné, consommant 2 kilogrammes de charbon par cheval-heure, on n'aurait donc à sacrifier qu'environ 2 °/₀ de l'effet utile pour se procurer les avantages du condenseur, qui se traduisent par un chiffre tout autrement important.

§ 4

CONDENSEUR DES MACHINES DE CORNOUAILLES

1246 — *Condenseur Létoret.* — Lorsqu'il s'agit spécialement de la machine de Cornouailles (p. 351), on dispose pour la condensation d'un intervalle de temps nettement appréciable, dû à l'inter-

mittence du moteur. Divers dispositifs [1] ont été introduits en vue de supprimer, dans ces conditions spéciales, la pompe à air.

Avec le *condenseur Létoret* (fig. 761) la vapeur d'équilibre arrive seule, et sans injection d'eau froide. On a réglé la détente de manière à laisser au fluide assez d'énergie pour donner une chasse, de manière à expulser d'un seul coup la plus grande partie de l'eau et de l'air qui sont restés depuis la course précédente. Dès que la pression tombe au-dessous d'une atmosphère, la soupape d'évacuation se referme, et l'on ouvre celle d'injection. On a évidemment alors beaucoup moins d'eau à fournir que dans les conditions ordinaires, pour achever la condensation jusqu'au même degré de vide, puisqu'une grande partie de la vapeur est sortie seule.

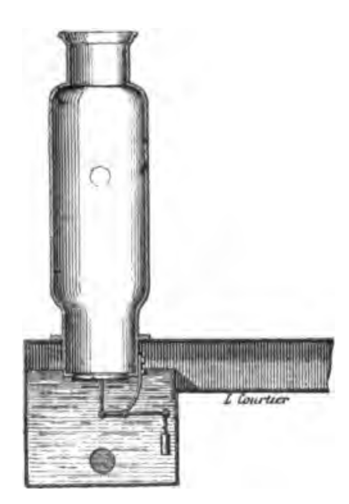


Fig. 761. — Condenseur Létoret. (Coupe verticale.)

Il est clair qu'il résulte de la suppression du mécanisme de la pompe une grande simplification, ainsi que l'économie d'une certaine quantité de travail parasite. On n'a d'ailleurs pas la prétention, bien entendu, de supprimer le travail théoriquement nécessaire pour l'évacuation du contenu d'une enceinte dans une autre à pression supérieure. Celui-ci se retrouve dans le reliquat d'énergie qu'on laisse en fin de course à la vapeur motrice. Mais cette portion du travail n'en est pas moins diminuée de son côté, puisque la quantité d'eau injectée se trouve elle-même réduite.

1247 — *Condenseur Devillaine.* — M. Devillaine a fait un pas de plus dans cette voie (fig. 762). Il s'agissait de pompes d'exhaure de mines mues par une machine de Cornouailles. Le peu de profon-

(1) Condenseurs sans pompe à air : Brossard. *Annales des mines*, juillet-août 1879, p. 179. — Hollmann. Rankine. *Manuel de la machine à vapeur*. Traduction Richard, p. 735. — Saxby. *Engineering*, 1875, p. 432.

deur du puits permettait d'employer l'eau d'épuisement à la condensation de la vapeur motrice.

Au lieu d'élever ce liquide seulement jusqu'au niveau du sol, on le fit monter à un niveau supérieur, à l'intérieur d'une bâche A, d'où un flotteur B, un clapet C, et une tuyère D le laissaient retomber dans une conduite DE latérale au condenseur. Ce dernier communiquait avec ce tuyau par des sifflets étroits, analogues à ceux des trompes [1]. De là une aspiration aidant à l'évacuation, à travers le clapet F, du condenseur G. Ce dernier recevait la vapeur par le tuyau H, et l'eau froide par l'orifice I.

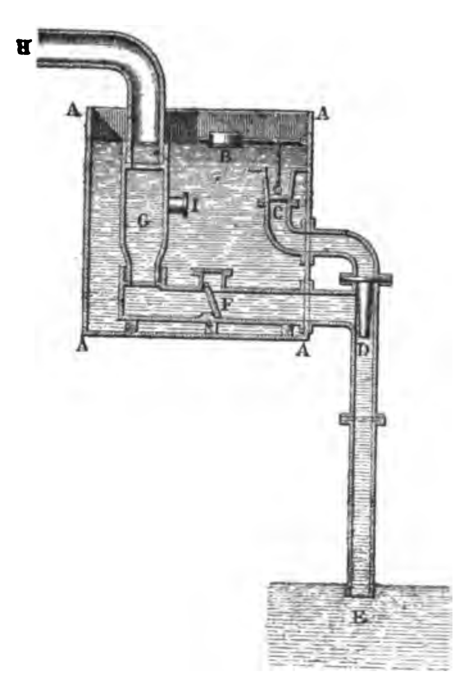


Fig 762. — Condenseur Devillaine. (Coupe verticale schématique.)

Encore une fois, un tel appoint ne saurait se créer sans travail. On peut même affirmer que ce mode spécial d'utilisation, à l'aide d'une trompe, du travail de surélévation effectué par le moteur est loin d'être le plus fructueux qui se puisse concevoir. Mais il s'agissait avant tout, dans ce cas particulier, de réaliser la simplicité. l'économie de quelques charbons de qualités invendables ne passant alors qu'au second plan.

(1) Voy. t. I, p. 91.

§ 5

ÉJECTEURS

1248 — L'eau d'injection poussée par la pression atmosphérique p_a dans une enceinte soumise à la tension p' s'y précipite avec la vitesse [1] :

$$v = \sqrt{2g\frac{p_a - p'}{\varpi}},$$

c'est-à-dire, en supposant un degré de vide au dixième :

$$v = \sqrt{2 \times 9{,}81 \cdot \frac{\frac{9}{10}10\,336}{1\,000}} = 13^m{,}50;$$

résultat considérable. La force vive correspondante reste sans aucun effet utile. Tout au contraire elle devient nuisible, puisqu'elle ne s'emploie qu'à développer de la chaleur dans une enceinte où l'on s'applique à entretenir le froid. Ensuite on va demander d'autre part au moteur une partie de son action, pour remettre en état de sortir ce liquide dont on a brisé l'impulsion.

Ce sont là des conditions d'application d'autant plus fâcheuses, que théoriquement cette énergie serait précisément suffisante pour faire sortir l'eau d'injection [2], qui forme de beaucoup la partie la plus importante de la masse à évacuer. Quant à l'appoint nécessaire pour ce qui concerne l'eau de condensation, l'air et les pertes accessoires, on en trouverait l'équivalent en conservant une différence suffisante entre la tension en fin de détente et la pression barométrique.

La difficulté consiste en ce que, au contraire du travail potentiel

(1) Voy. t. I, p. 47.

(2) Comme un pendule qui trouve, pendant la seconde moitié de son oscillation, le moyen de gravir la pente et de remonter à son niveau initial, dans la force vive acquise pendant sa descente sous l'action de la force qui, alors motrice, est depuis devenue résistante.

et de la chaleur, la force vive ne peut attendre pour son utilisation [1]. On ne saurait la mettre en œuvre dans le cas actuel qu'en rendant continue l'opération [2], essentiellement alternative, qui consiste à introduire de l'eau, à la laisser reposer, et à entreprendre seulement alors de la faire sortir.

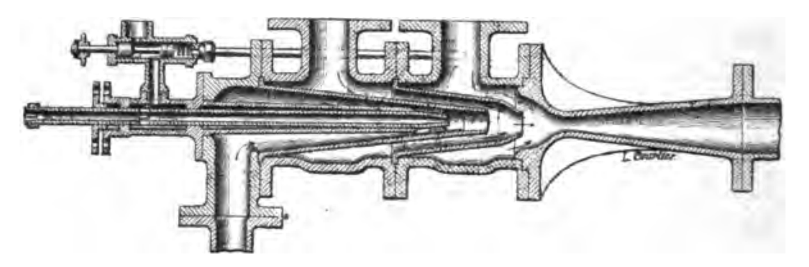


Fig. 765. — Éjecteur Morton (coupe verticale).

Dans cette nouvelle conception, le liquide ne fera plus que *traverser* l'enceinte réfrigérante, au lieu d'y *séjourner*. La force vive que lui a communiquée son entrée sous l'impulsion de la pression atmosphérique est employée du même coup à effectuer sa sortie malgré cette pression. On a soin seulement, ainsi qu'il a été dit, de limiter assez la détente pour laisser à la vapeur la puissance d'assu-

[1] L'*énergie potentielle* se conserve *indéfiniment*. Si, par la pensée, on laissait, de nos jours, redescendre dans un appareil récepteur les blocs qui couronnent le faîte des pyramides d'Égypte, on recueillerait aujourd'hui le travail développé par les fellahs contemporains des Pharaons; et leurs descendants à la centième génération pourraient, sans effort personnel, accomplir une besogne industrielle dont le ressort effectif ne serait autre que la peine prise par leurs ancêtres.

L'*énergie calorifique* peut également, mais sans aucune comparaison avec la forme précédente, se conserver *pendant quelque temps*, et ne se dissipe que peu à peu par le rayonnement et la conductibilité.

L'*énergie actuelle*, ou force vive, ne peut se conserver que si l'on accompagne le long de sa trajectoire, comme dans une rivière, la masse qui en est actuellement dépositaire. Lorsque celle-ci est, comme pour le cas actuel, un liquide enfermé dans une enceinte, la force vive s'use *presque immédiatement* en divers frottements et tourbillonnements, et sa perte est définitive.

[2] Ou en dénaturant cette force vive de manière à la faire repasser sous la forme d'énergie potentielle, qui permet alors d'attendre pour la remettre en œuvre. On a en effet proposé d'installer le condenseur en contre-haut. Alors le travail de l'atmosphère se trouve employé autant que possible à faire gravir au liquide cette hauteur. L'équivalent se retrouve ultérieurement sous forme de succion, comme dans le cas du condenseur Devillaine (n° 1247), quand on laisse les matières redescendre au niveau inférieur.

rer la réussite complète de l'opération. Cet artifice employé dans les *éjecteurs* actuels [1] est en effet plus économique que l'intervention d'un jet de vapeur spécial, comme on l'avait fait à l'origine (fig. 763) pour l'éjecteur Morton [2].

A la vérité l'on ne peut voir, dans tout ce qui précède, qu'un enchaînement logique d'idées. Il restait à trouver l'organe qui en assurerait effectivement la réalisation [3]. Cet organe s'est manifesté de lui-même par la belle découverte de Giffard (p. 718), qui permet avec tant de netteté de faire franchir à une veine liquide l'obstacle d'un clapet, derrière lequel se trouve une pression supérieure. C'est en effet à l'aide de systèmes analogues d'ajutages convergents-divergents, dont l'expérience a révélé les meilleures dispositions, que l'on a construit les nouveaux condenseurs-éjecteurs (fig. 764).

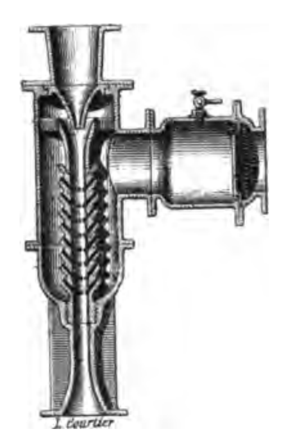


Fig. 764. — Éjecteur Kœrting. (Coupe verticale.)

(1) Éjecteurs : Bohler. *Revue technique de l'Exposition de* 1889, 6e partie, t. I, p. 364. — Brossard (*Revue industrielle*, 1880, p. 261. — *Portefeuille économique des machines*, 1880, p. 120). — Kœrting (*Bulletin de la Société d'encouragement*, 3e série, t. II, p. 539; 4e, IV, 451. — *Les Mondes*, t. XLIII, p. 612. — *Revue universelle des mines et de la métallurgie*, t. XXXVIII, p. 198. — *Comptes rendus mensuels des séances de la Société de l'industrie minérale de Saint-Étienne*, décembre 1875, janvier 1876, février 1877, avril 1878). — Mac Carter (*Institution of mechanical Engineers*, 1876. — *The Engineer*, 1876, p. 110).

(2) *Bulletin de la Société d'encouragement*, 1870, p. 546. — *Annales des mines*, 6e série, t. XV, p. 85. — *Comptes rendus mensuels des séances de la Société de l'industrie minérale de Saint-Étienne*, mai 1877. — Hirsch. *Rapport sur l'Exposition de* 1878, p. 127. — *Revue universelle des mines et de la métallurgie*, t. XXV-XXVI, p. 415. — Rankine. *Transactions of the Institution of Engineers in Scotland*, 1869. — *The Engineer*, 3 octobre 1885. — *Engineering*, décembre 1885, p. 577. — *American machinist*. 4 juin 1881, p. 5.

(3) Sabathier. Suppression de la pompe à air. *Bulletin technologique de la Société des anciens Élèves des Écoles d'arts et métiers*, février 1885. — *Revue technique de l'Exposition de* 1889, 6e partie, t. I, p. 364. — A new condenser. *American machinist*, 22 janvier 1881, p. 5.

CHAPITRE LXV

INDICATEUR

—

§ 1

INDICATEUR

1249 — *Indicateur de Watt.* — *L'indicateur de Watt* ([1]) est un

([1]) Albert Thomas. *Du dynamomètre indicateur de Watt et de la manière de s'en servir.* — Note sur l'indicateur de Watt. *Association parisienne des Propriétaires d'appareils à vapeur*, 1883. — Dwelshauvers-Dery. L'indicateur de Watt. *Revue universelle des mines et de la métallurgie*, t. XXIII-XXIV, p. 329; XXV-XXVI, 168. — Delaunay. *Traité élémentaire de mécanique*, p. 668. — Buchetti. *Guide de l'essai des machines*, p. 1. — Robinson. *Mechanical philosophy*, t. II, p. 156. — Richard. L'indicateur. *La lumière électrique*, 22, 29 novembre, 6, 13 décembre 1884; 23 mai 1885; 18 février 1888; 13 février 1892. — Quéruel (Méthode pour le calcul du diagramme des machines à vapeur. Rapport Haton de la Goupillière. *Bulletin de la Société d'encouragement*, 3e série, t. IX, p. 13. — Relation entre le diagramme de la machine à vapeur et la pesée d'eau d'alimentation. *Mémoires de la Société des Ingénieurs civils*, 22 avril 1881). — De Maupeou. Étude sur les indicateurs. *Mémorial du Génie maritime*, 1881, 5e livraison. — Leloutre (*Du degré d'exactitude des données d'observations d'un essai de machine à vapeur*, 1884, in-8°. — *Vérification d'une série d'essais sur une machine de Woolf*, 1885, in-8°). — Réducteur différentiel Laharpe pour les essais de machines à vapeur. *Génie civil*, p. 108. — Leclercq. Tracé géométrique des courbes de pression. *Bulletin de la Société industrielle du Nord de la France*, 1886, p. 356. — Hallauer. Note sur une modification apportée à l'indicateur de Watt par Hirn. *Bulletin de la Société industrielle de Mulhouse*, 1873, p. 245. — De Fréminville. *Cours de machines de l'École du Génie maritime.* — Boulvin (*Note sur les diagrammes de deux machines marines*, Gand, 1886, in-8°. — Essai d'une machine compound de filature. *Annales de l'Association des Étudiants sortis des Écoles spéciales de Gand*, t. XIII, 1er fascicule). — Delafond. Essais effectués sur une machine Corliss aux usines du Creuzot. *Annales des mines*, septembre-octobre 1884. — Bienaymé. *Les machines marines*, p. 147. — Rankine. *Manuel de la machine à vapeur*. Traduction Richard, p. 49 et 585. — Haton de la Goupillière. Revue des progrès récents de la construction des machines à vapeur. *Annales des mines*, 7e série, t. XVI, p. 201. — *Congrès des Ingénieurs en chef des Associations de Propriétaires d'appareils à vapeur*. Treizième

ingénieux appareil qui permet d'étudier en détail les diverses phases de l'action de la vapeur sur le piston, en fournissant une représentation graphique de ce fonctionnement.

Il se compose (fig. 765) d'un petit corps de pompe A, que l'on visse sur une tubulure ménagée dans ce but en un point du cylindre ([1]). Un robinet B permet d'y admettre la vapeur qui remplit ce dernier. On reçoit sa pression sur un petit piston, dont la face supérieure est toujours à l'air libre. Sa tige C sort au dehors; elle est repoussée par un ressort D, et porte un bras rectangulaire, qui parcourt une fenêtre longitudinale pratiquée dans la paroi. Cette potence conduit le style chargé de tracer la courbe, et une arti-

Congrès, p. 256, 262, 269, 271; Quatorzième Congrès, p. 185, 189, 194, 202, 205. — Tresca. Essais de machines à vapeur. *Annales du Conservatoire*, machines Gache, 28 juin 1863; Benjamin Normand, 15 octobre 1863; Leclercq, 15 octobre 1864; Balian, 30 janvier 1865; Lédiard et Joly, 18 juillet 1865; Aveling et Porter, 15 janvier 1868; Allen, 26 janvier 1868. — Isambert. Essai d'une machine à triple expansion. *Mémoires de la Société des Ingénieurs civils*, mars 1892, p. 383.

Osborne Reynolds. On the Theory of the indicator and the errors in indicator diagramms. *Institution of civil Engineers*, 19 mai 1885. — Burgh. *The indicator diagramm practically considered.* — The steam Engine indicator. Hanging the reducing levers. *Journal of Franklin Institute*, mai 1884. — Improvement in steam Engine indicator springs. *American machinist*, 19 novembre 1881. — Graham. *An elementary treatise on steam and the use of the indicator*, 1877, in-8°. — Hemenway. The indicator diagramms. *American machinist*, 16 février, 5, 19, 26 juillet, 9 août, 29 novembre 1884; 14, 28 février 1885. — Application of the indicator to locomotives (*The railroad Gazette*, 6 juillet 1883, p. 441. — *American Journal of Railway Appliances*, 1er avril 1885, p. 152). — Grunshaw. Abstract of paper on the comparaison of indicator Rigs. *Journal of Franklin Institute*, juillet 1883. — Thurston. *A handbook of Engine and Boiler trials and of the indicator and Prony break*. New-York, 1890, in-8°. — Standard. Method of steam Boiler Trials. *Van Nostrand's Engineering Magazine*, 1885, p. 211, 308. — Copeland. On the comparative economy of condensing and non condensing engines. *American machinist*, 30 décembre 1882, p. 6. — Isherwood. On experimental inquiry into the relative economic efficiencies of a Corliss condensing and a Corliss non condensing Engine. *Journal of Franklin Institute*, septembre 1881, p. 170.

Bauschinger. Indicator Versuche in Lokomotiven. *Civil Ingenieur*, Band. 13, 14. — Moritz Ritter von Pichler. *L'indicateur du travail et du fonctionnement des machines à piston, et son diagramme*. Traduction Seguela, in-8°. — Riedler. Expériences à l'indicateur sur les machines d'épuisement. Munich, in-folio, 1882. — Zeuner. Calorimetrische Untersuchungen der Dampfmaschinen. *Civil ingenieur*, 1881, 1882. — Schrœter. Calorimetrische Untersuchungen einer Compoundmaschine. *Ibidem*, 1881. — Lüders. Zùr Theorie des Indicatordiagrammes. *Ibidem*, 1881. — Fliegner (Bestimmung der Hauptpunkte eines Indicatordiagrammes. *Schweizerische Bauzeitùng*, 1882. — Untersuchùng einiger Indicatordiagramme. *Ibidem*, 1888).

([1]) Quand les communications sont prises de plus loin, elles doivent être établies à l'aide d'une section suffisante pour que la pression se transmette sans pertes sensibles.

culation permet de l'appliquer contre le papier ou de l'en écarter à volonté.

On voit dès lors que les ordonnées, représentées par les valeurs variables du refoulement du ressort, sont proportionnelles à sa tension, c'est-à-dire à l'effort qui lui fait équilibre, ou enfin à la pression par unité de surface.

Fig. 765 et 766. — Indicateur de Watt. (Plan et élévation.)

La feuille destinée à recevoir le tracé est appliquée sur un cylindre F, à l'aide de deux pinces G, G′ qui font ressort pour l'y maintenir. Une ficelle H détermine, par sa traction tangentielle, le mouvement alternatif de rotation de ce rouleau autour de son axe. Il s'ensuit un déroulement en abscisses, que l'on peut considérer comme variant en raison du déplacement du piston moteur. En effet, cette cordelette s'attache, sinon directement à la tige de ce dernier qui éprouverait de trop grands déplacements, du moins en un point du balancier, ou de toute autre manière qui permette une réduction proportionnelle. Un ressort renfermé dans le barillet I ramène le système en sens contraire, pendant la contre-course du piston-moteur qui cesse de tendre la ficelle.

Il suit de ces explications que l'aire élémentaire du diagramme représente, à une certaine échelle, le produit de la force par l'élément de chemin que décrit son point d'application, en un mot la différentielle du travail. La branche supérieure de la courbe fermée

donne par suite la mesure du travail moteur durant la course directe : la branche inférieure fournit celle du travail résistant qui s'oppose à la course rétrograde ; et enfin l'aire du noyau central représente la différence de ces deux quantités, c'est-à-dire le travail effectivement recueilli par le piston dans une course simple. On l'appelle le *travail indiqué* [1] ; on l'exprime en *chevaux indiqués*.

Ces principes très simples prêtent le flanc à plusieurs objections, qui ont donné carrière à la sagacité des inventeurs [2]. Nous signalerons les principaux points sur lesquels ont porté les perfectionnements.

[1] Par analogie avec le mot *indicateur*. On distingue, d'autre part, le *travail-frein* et les *chevaux-frein*, mesurés directement au frein de Prony sur l'arbre de la machine. La différence représente la perte dynamique subie dans les organes du moteur à vapeur.

[2] Indicateurs : ASHTON et STOREY (Habets. *Revue universelle des mines et de la métallurgie*, t. XXXV, p. 25. — *Scientific american supplement*, 13 février 1886 p. 8430. — BACHELDER. *La lumière électrique*, 13 février 1892, p. 310. — BOYE. *Ibidem*, 29 novembre 1884, p. 333. — BROWN (*Mechanical Progress*, avril-mai 1890. — *Sheffield Society of Engineers*, 13 mars 1890). — CASARTELLI et POTTER. *La lumière électrique*, 22 novembre 1884, p. 290. — CROSBY (*Revue industrielle*, 30 juillet 1884. — *Revue générale des sciences pures et appliquées*, 15 mai 1890, p. 266. — *Neuvième Congrès des Ingénieurs en chef des Associations de Propriétaires d'appareils à vapeur*, p. 120). — DARKE. *La lumière électrique*, 22 novembre 1884, p. 292. — DUVERGIER. *Congrès de l'Association française pour l'avancement des sciences*, Le Havre, 1877, p. 219. — ELLIOTT. Von Pichler. *L'indicateur du travail*, etc. Traduction Seguela, p. 7. — PAUL GARNIER. Ledieu. *Nouvelles machines marines*, t. III, p. 256. — HAMBRUCK. *La lumière électrique*, 6 décembre 1884, p. 366. — HINE et ROBERTSON (fig. 768). *The Engineering and mining Journal*, 2 août 1890, p. 122. — HOPKINSON. *La lumière électrique*, 22 novembre 1884, p. 286. — KENIOU. *Ibidem*, 29 novembre 1884, p. 332. — KRAFT. Von Pichler. *L'indicateur du travail*, etc. Traduction Séguéla, p. 7. — LEA. Buchetti. *Guide pour l'essai des machines*, p. 31. — LEFEBVRE. *Revue industrielle*, 9 août 1890. — MAC-JONES. *La lumière électrique*, 13 février 1892, p. 304. — MAC-NAUGHT. *Ibidem*, 23 novembre 1884. — MALLET. *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, t. LXXXII, p. 1331. — MARTIN. Buchetti. *Guide pour l'essai des machines*, p. 10. — MINNE. *Engineering*, 2 août 1889, p. 158. — PIMBLEY. *La lumière électrique*, 6 décembre 1884, p. 366. — PRUSSMANN. *Ibidem*, p. 365. — RICHARDSON. Buchetti. *Guide pour l'essai des machines*, p. 20. — RIG (*American machinist*, 1er avril 1882, p. 2. — *American journal of railway appliances*, 15 novembre 1884, p. 260). — ROSENKRANTZ. Buchetti. *Guide pour l'essai des machines*, p. 15. — SCHŒFFER et BUDENBERG. *La lumière électrique*, décembre 1884, p. 328. -- SMITH. *Ibidem*, 22 novembre 1884, p. 290. — STANEK. *Revue industrielle*, 1880, p. 213. — STORES. Rankine. *Manuel de la machine à vapeur*. Traduction Richard ; p. 585. — SWEET. *La lumière électrique*, 22 novembre 1884, p. 291. — TABOR. *Engineering*, 7 juin 1889. — THOMPSON. *La lumière électrique*, 22 novembre 1884, p. 289. — VERNON BOYS. *Revue industrielle*, 5 décembre 1883. — WILLIAMS. *Ibidem*, 15 août 1883, p. 321.

1250 — *Indicateur Clair.* — On a été bientôt frappé de dissemblances très sensibles que présentaient divers diagrammes tirés avec l'indicateur de Watt dans des courses successives. Quand on laissait le crayon parcourir plusieurs fois le profil, au lieu de repasser exactement dans le même tracé, il suivait quelquefois des routes voisines, et l'ensemble aboutissait à une sorte de brouillage d'une certaine épaisseur, au lieu d'un trait fin. On en concluait (à tort, comme nous le verrons) que la machine à vapeur manquait de constance, et que ses diverses courses n'étaient pas identiques entre elles. Il semblait dès lors qu'il y eût utilité à les détacher les unes des autres, de manière à en obtenir des représentations graphiques distinctes et consécutives.

Dans l'appareil de Clair [1], qui a été conçu et ingénieusement disposé pour cet ordre d'idées, on substitue au mouvement d'allée et venue d'un carré de papier le déplacement continu d'une bande. Celle-ci se déroule d'un cylindre, pour se réenrouler sur un second, en passant tangentiellement devant un rouleau intermédiaire. Ce dernier sert de point d'appui pour la pointe traçante, dont le mouvement vertical s'opère le long de la génératrice de contact. La partie inférieure du diagramme doit alors se retourner sur elle-même pour cheminer, non plus en retour, mais en prolongement de la branche supérieure, jusqu'à ce qu'elle se soude plus loin au graphique d'une course nouvelle, qui fait suite au précédent.

Pour obtenir ce résultat, on dispose sur l'axe oscillant des saillies représentant ce qui resterait d'une vis à filet triangulaire, si on la faisait tarauder par une vis de sens contraire, identique comme dimensions, et montée sur le même noyau. On fait engrener cette pièce assez originale avec deux portions de tore, filetées respectivement comme les écrous de chacune de ces vis.

Chaque oscillation de l'axe imprime à ces roues des rotations contraires, qui changent de sens l'une et l'autre en même temps que l'axe. Ces organes actionnent l'axe de l'appareil à bande, par l'intermédiaire de deux encliquetages Dobo [2] disposés en même sens. Par là elles n'agissent sur cet axe que dans un même sens,

[1] Haton de la Goupillière. *Traité des mécanismes*, p. 330.
[2] Haton de la Goupillière. *Traité des mécanismes*, p. 384.

et de plus il y en a toujours une, et une seule, qui transmet le mouvement.

1251 — Cette tentative devait être mentionnée ici pour son ingéniosité. Cependant elle était condamnée à ne pas se répandre, parce qu'elle reposait sur une appréciation erronée de la difficulté.

L'on n'a pas tardé, en effet, à reconnaître que les inégalités que l'on s'attachait avec tant de soin à mettre en lumière, constituaient de véritables perturbations parasites, dues à une cause tout à fait étrangère; et que l'on devait au contraire s'attacher avec le même soin à les faire disparaître.

Cette influence est celle du *lancé* du ressort, c'est-à-dire la substitution de son état dynamique aux conditions statiques que supposent les raisonnements précédents, pour que sa forme géométrique puisse à chaque instant servir de mesure à la pression de la vapeur. Tout au contraire, dans la rapidité de l'allure, le ressort prend des mouvements désordonnés qui lui font dépasser le but dans les deux sens, et greffer, sur son mouvement général, diverses petites vibrations qui viennent en altérer la continuité et en fausser l'interprétation.

Il s'agissait donc de débarrasser de cette influence les indications de l'appareil, en commençant par lui rendre son ancien fonctionnement à mouvement alternatif. C'est, en conséquence, de ce côté que se sont portés les efforts des novateurs.

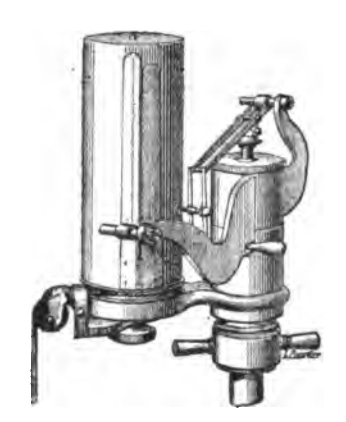


Fig. 767. — Indicateur Richard. (Vue perspective).

1252 — *Indicateur Richard.* — L'indicateur Richard ([1]) est l'un des modèles les plus répandus dans

([1]) Porter. *A Treatise on the Richard's steam engine indicator*, London, in-8°. — *La lumière électrique*, t. XIV, p. 286, 327, 365, 406. — Buchetti. *Guide de l'essai des machines à vapeur*, p. 7. — Ledieu. *Nouvelles machines marines*, t. III, p. 261. — *Revue universelle des mines et de la métallurgie*, t. XXV-XXVI, p. 168.

la pratique (fig. 767). L'auteur s'est attaché à mettre son appareil en état de résister aux causes de lancé. Pour cela il emploie un ressort relativement dur. Mais comme il en résulte que les déformations restent très petites, il amplifie ces dernières au moyen d'un appareil analogue au pantographe ([1]). Le piston fonctionne librement, mais avec un faible jeu. L'influence du frottement s'en trouve d'ailleurs d'autant plus atténuée. Une enveloppe préserve le petit cylindre des chocs et du refroidissement, en même temps qu'elle le rend, pendant les expériences, plus maniable malgré la chaleur.



Fig. 768. — Indicateur Hine et Robertson (vue perspective).

1253 — *Indicateur Martin-Garnier.* — M. Martin-Garnier s'est placé au point de vue inverse, en cherchant à diminuer les causes mêmes du lancé. L'efficacité du moyen employé à cet effet a toutefois été révoquée en doute ([2]).

Quoi qu'il en soit, au lieu de faire arriver directement la vapeur sous le piston, l'auteur l'introduit dans une chambre qui en est séparée par une soupape. Le choc du fluide se trouve ainsi amorti. Un purgeur permet d'évacuer l'eau qui peut se former dans cette capacité au-dessous du clapet. Le ressort de rappel, au lieu d'être adapté au tambour, est fixé à un pignon hélicoïdal engrenant avec ce dernier. En variant le diamètre de la poulie sur laquelle s'enroule la corde, on obtient un réducteur arbitraire de courses, qui permet de mettre l'appareil en rapport avec l'amplitude des divers moteurs.

([1]) Haton de la Goupillière. *Traité des mécanismes*, p. 198.
([2]) Buchetti. *Guide de l'essai des machines à vapeur*, p. 55.

1254 — *Indicateur Marcel Deprez.* — Une solution absolument nette a été indiquée par M. Marcel Deprez pour écarter les effets du lancé [1].

Dans ce but, l'inventeur ne laisse tracer, dans toute l'étendue d'une course du moteur, qu'un simple élément de la courbe (un seul point, en quelque sorte), et prend pour cela le ressort à l'état

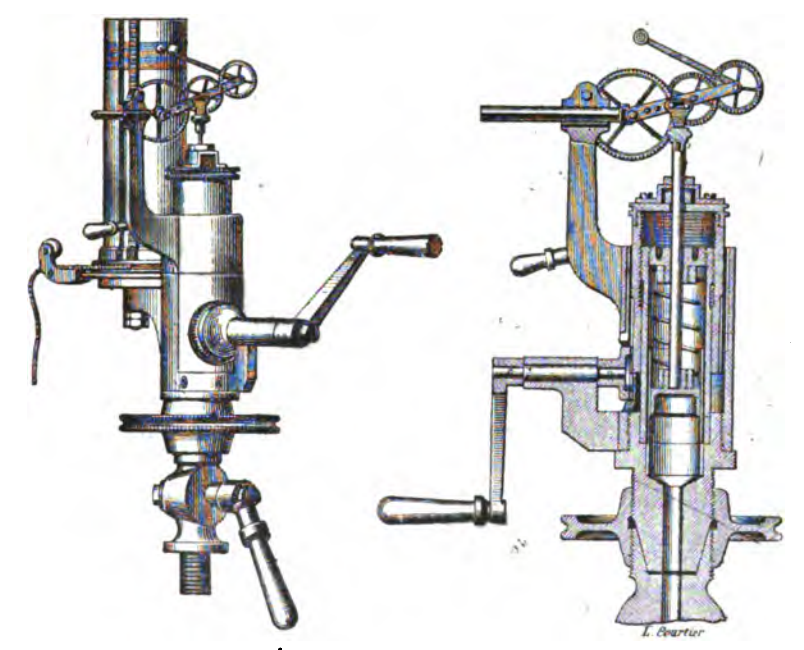


Fig. 769 et 770. — Indicateur Marcel Deprez (élévation et coupe).

de repos. Seulement on réitère l'opération, en demandant aux diverses courses successives des éléments consécutifs dont l'ensemble constitue le tracé intégral, obtenu ainsi à l'abri de toute influence dynamique.

Le cylindre A (fig. 769, 770, 771) se visse sur la tubulure du cylindre. Il est lui-même fileté à son extérieur, et un chapeau B

[1] *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, t. LXXIII, p. 654; t. LXXXIX, p. 861. — *Annales industrielles*, 26 mai 1872. — *La Lumière électrique*, 25 août, 3 septembre 1881; 22 novembre 1884. — Hirsch. *Rapport sur l'Exposition de* 1878, p. 585. — Rankine. *Manuel de la machine à vapeur*. Traduction Richard, p. 585. — *Congrès de l'Association française pour l'avancement des sciences*, Clermont, 1876, p. 200.

vient se visser sur lui. Un ressort se trouve interposé, prenant son point d'appui sous le fond du chapeau et sur le piston. Au commencement la pleine pression, plus forte que ce ressort, le soulève; mais immédiatement la traverse *p* se plaque contre le fond *b'*. Une simple course de 2 millimètres lui est permise à cet égard. Lorsque la détente affaiblit progressivement la tension, il vient un moment où celle-ci équilibre exactement le ressort, puis elle diminue encore au delà : c'est à cet instant précis que l'élasticité rabat le système, en lui faisant effectuer cette petite chute de 2 millimètres.

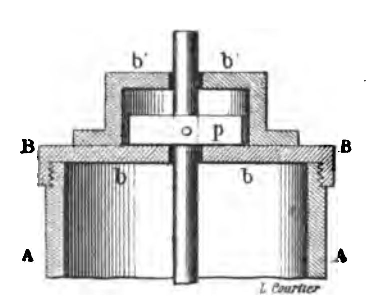


Fig. 771. — Indicateur Marcel Deprez. (Figure schématique).

Pendant ce temps, le papier a effectué son mouvement. Le crayon immobile y a tracé une section droite du cylindre, qui se trouve déroulée en 12 sur la figure 772. Le décrochement 23 marque l'élément de diagramme qui correspond à l'instant d'équilibre. Puis le crayon trace une nouvelle horizontale 34 jusqu'au fond de course. En revenant, la tension a encore diminué; c'est celle de l'échappement.

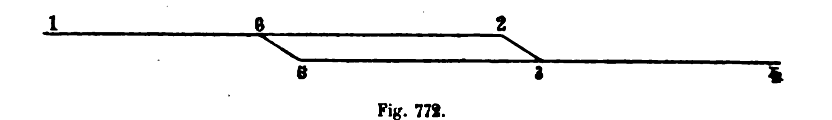


Fig. 772.

L'arrêt *p* reste donc plaqué, et le crayon repasse dans le même trait 43. Puis, la phase de compression commençant, la tension se relève progressivement, et il vient un moment où elle se retrouve en état de faire équilibre au ressort, et d'en vaincre ensuite l'élasticité. A cet instant, le système se trouve reporté brusquement à 2 millimètres plus haut, et un nouveau décrochement 56 en conserve la trace. Puis la pointe repasse dans l'horizontale 61.

L'ensemble de la course a donc laissé sur le papier la figure 1234561. Si les choses restaient en cet état, le crayon la retracerait indéfiniment dans les courses ultérieures. Mais suppo-

sons que l'on tourne à la main le chapeau B, de manière à le visser d'une petite quantité sur son écrou A. D'une part, le système descendra dans l'espace, et viendra effectuer son tracé un peu au-dessous de l'ancien. D'un autre côté, le ressort ayant été comprimé davantage par ce resserrement, les deux instants d'équilibre ne seront plus les mêmes qu'auparavant, et les décrochements ne

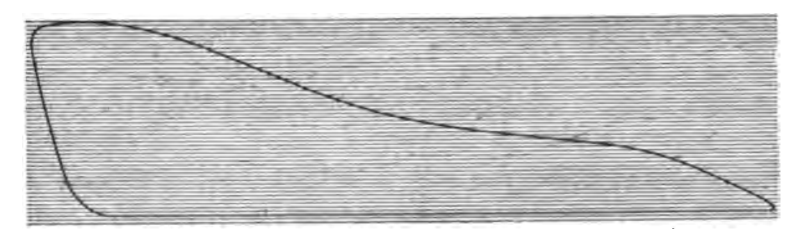


Fig. 773.

correspondront plus aux mêmes abscisses. On obtiendra d'après cela, en vissant progressivement le chapeau, une série de stries horizontales, ainsi qu'un ensemble de décrochements se faisant suite les uns aux autres (fig. 773), et dessinant nettement à l'œil, par leur ensemble, le diagramme rigoureux qu'il s'agissait d'obtenir.

1255 — *Indicateur Cody.* — L'*indicateur* Cody [1] est destiné à remédier à un défaut qui est commun à tous les autres, car il est inhérent au principe même du tracé dynamométrique.

Si la compression n'est pas parfaite, la pression remonte si vite pendant l'échappement anticipé, que l'indicateur ne peut rien enregistrer d'utile pour cette phase, si intéressante cependant. Il trace toujours une verticale. En effet, en même temps que le mouvement en ordonnées est si rapide, la vitesse d'accroissement de l'abscisse reste rigoureusement nulle, car on se trouve au point mort, et sans vitesse appréciable du piston moteur ni du papier qu'il conduit.

Pour l'étude spéciale de cette phase, M. Cody emploie un mouvement chronométrique qui assure à la bande de papier un déroulement uniforme. L'abscisse est proportionnelle au temps, et non plus

[1] Buchetti. *Guide de l'essai des machines à vapeur*, p. 5.

au chemin parcouru par le piston; et l'aire n'a plus rien de commun avec le travail. Une telle courbe sert seulement de document pour apprécier les circonstances de la marche, à cette extrémité de la course.

1256 — *Indicateur Perry.* — Au lieu de tirer un diagramme isolé, M. Perry s'est proposé de maintenir sous les yeux du mécanicien une image permanente de ce diagramme, avec les fluctuations de formes qu'il peut à l'occasion traverser. Il y est arrivé par l'invention de son *indicateur optique* ([1]). Ce n'est plus alors un tracé matériel et effectif que l'on obtient, mais une simple impression lumineuse due à la persistance des impressions produites sur la rétine par un point brillant, en mouvement rapide sur sa trajectoire.

La vapeur est admise à cet effet dans une boîte recouverte par un disque élastique, qui se gonfle d'une manière variable avec la pression. Un petit miroir est placé au milieu de l'un des rayons de ce cercle. Il prend ainsi des inclinaisons successives, qui renvoient un pinceau lumineux dans des directions incessamment modifiées, mais comprises en un même plan vertical.

D'un autre côté, la boîte, montée sur deux tourillons situés dans ce plan, exécute des balancements alternatifs en raison de sa liaison avec le moteur. En raison de ces deux mouvements composants orthogonaux, le point lumineux projeté sur un écran y parcourt un diagramme qui reste, ainsi qu'il a été dit, perpétuellement apparent aux yeux du mécanicien.

§ 2

DIAGRAMME

1257 — Nous avons déjà signalé la différence qui sépare le diagramme tracé par l'indicateur et le contour représentatif du cycle fermé suivi théoriquement par la vapeur.

([1]) Raffard. *Bulletin technologique de la Société des anciens Élèves des Écoles d'arts et métiers*, septembre 1891, p. 642. — *La Nature*, 27 juin 1891. — *Industries*, 7 juin 1891.

Ce dernier (tome I, p. 814, note 1) nous a permis de traverser les diverses phases de l'évolution subie par 1 kilogramme de vapeur, que nous accompagnons par la pensée, sans que sa masse change jamais, à travers la chaudière, le sécheur, la tuyauterie, la boîte à vapeur, la lumière d'admission, le cylindre, la lumière d'échappement, le condenseur, la pompe à air, la bâche à eau chaude, et enfin l'injecteur qui le réintègre dans la chaudière. Ce cycle est représenté par un contour tel que ABCDEA (fig. 289, t. I, p. 814).

Toute autre chose est l'étude que l'indicateur nous permet de faire. Nous l'avons déjà résumée ci-dessus (t. II, p. 157, fig. 381). A l'inverse de la précédente, elle ne concerne qu'une seule enceinte : le cylindre, au lieu de toute la succession précédente. En outre les influences qui se trouvent enregistrées se rapportent à une quantité de vapeur essentiellement variable, au lieu que dans le premier cas celle-ci restait immuable. Cette matière comprend : 1° un stock invariable qui évolue de manière à remplir, à un certain moment, l'espace libre en pleine pression; 2° la cylindrée proprement dite, dont la masse varie au contraire incessamment, croissante à partir de zéro pendant l'admission, stationnaire pendant la détente, décroissante pendant l'échappement, jusqu'à zéro pour le moment où le stock seul est chargé de reconstituer la pression dans l'espace libre. Cette peinture fidèle de ce qui se passe dans le cylindre présente l'aspect théorique *abcc'deff'a* (t. II, p. 157, fig. 381), en relation avec la pleine pression AB, la détente BC, l'échappement anticipé CD, l'échappement proprement dit DE, la compression EF, l'admission anticipée FA. Dans la réalité, ce profil estompe ses contours anguleux sous une forme adoucie, telle que $\alpha\beta\gamma\delta\varepsilon\varphi\alpha$. C'est à une telle courbe que nous réservons ici le nom de *diagramme*. C'est elle que fournit l'indicateur, et ses contours révèlent à un coup d'œil expérimenté les qualités et les défauts de la marche d'une machine.

1258 — Pour *tirer* un diagramme, on commence par faire fonctionner l'indicateur pendant quelques instants, afin de lui laisser prendre la température normale. On ferme alors le robinet à deux voies, pour intercepter la vapeur du cylindre moteur et évacuer

celle du petit corps de pompe, puis on laisse effectuer le mouvement. Le piston n'est alors sollicité que par l'atmosphère, et le crayon trace la *ligne atmosphérique*. Cette horizontale correspond à une pression effective nulle, et sert de repère pour les autres tensions. On admet de nouveau la vapeur, et, en imprimant le mouvement sous pression, l'on tire un ou plusieurs diagrammes.

1259 — Si l'indicateur n'est mis en rapport qu'avec une seule face du piston moteur, on obtient un diagramme unique (fig. 773).

Si l'on veut étudier à la fois les deux faces, ce qui sera spécia-

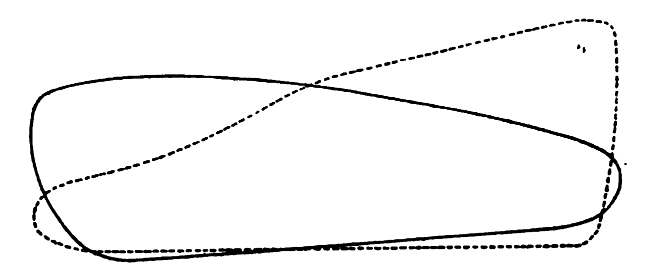


Fig. 774. — Diagramme d'une machine à double effet.

lement intéressant pour les machines verticales, on associe deux diagrammes en sens contraires (fig. 774).

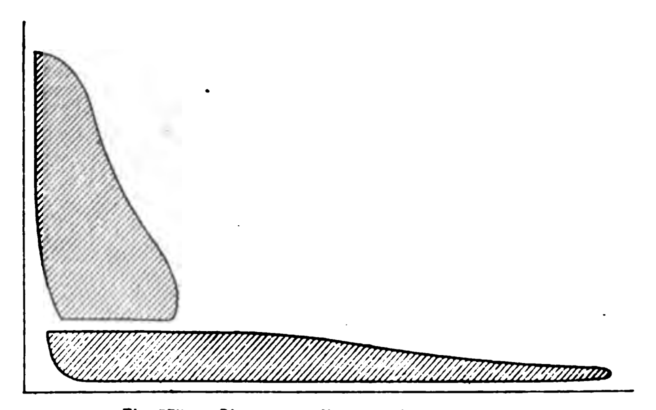


Fig. 773. — Diagramme d'une machine compound.

Avec les machines de Woolf, on superpose l'un au-dessus de l'autre deux noyaux relatifs aux deux cylindres (fig. 775). Une

petite bande intermédiaire les sépare. Sa largeur estimée parallèlement à l'axe des ordonnées représente, pour les diverses abscisses, la chute de pression que présente une même masse de vapeur, entre la face d'aval du piston qui la refoule et la face d'amont du piston suivant, qu'elle pousse en traversant des passages étroits, capables de déterminer des pertes de charge.

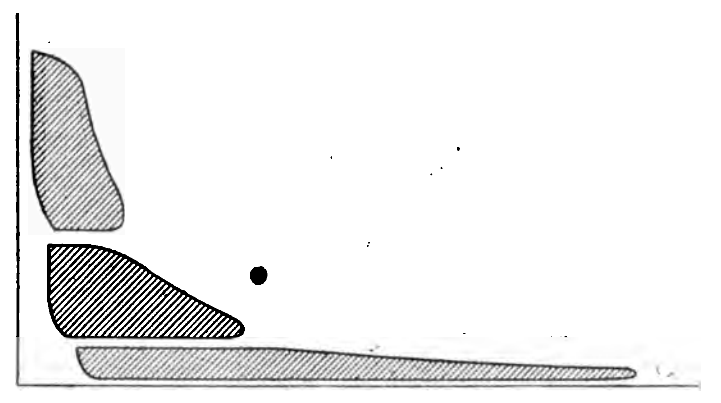


Fig. 776. — Diagramme d'une machine à triple expansion.

Dans les moteurs à triple ou à quadruple expansion, on échafaude de même (fig. 776) trois ou quatre noyaux étagés. On obtient à l'aide de ces courbes d'indicateur le diagramme totalisé d'une machine compound.

1260 — Quand il s'agit d'évaluer la superficie du diagramme, on emploie les formules de quadratures approchées de Poncelet ou de Simpson, ou plus souvent encore le planimètre d'Amsler [1].

Pour interpréter la signification dynamique du résultat géométrique ainsi obtenu, l'on possède, d'une part, l'*échelle des espaces*,

[1] Théorie du planimètre d'Amsler. *Annales des mines*, 1871, 1882, 1883, 1887. — Sébert. Note sur l'intégromètre Deprez et le planimètre d'Amsler. *Mémorial de l'artillerie de la marine*, t. XVIII, 1875. — Diagrammomètre Kozloff. *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, 21 juillet 1890, p. 166. — Intégrateur Puplus. *Revue industrielle*, 20 février 1884. — Abdank-Abakanowicz. *Les intégraphes*, Gauthier-Villars, 1886, in-8°. — Gieseler. The polar planimeter, its theory and use. *Scientific American supplement*, 17 mars 1888, p. 10174. — Shaw. *On mechanical integrators*. — Pearson. A new integrator. *Engineering*, 31 janvier 1890, p. 129.

c'est-à-dire le rapport de la course du piston moteur avec l'amplitude du mouvement du papier en abscisse, et de l'autre l'*échelle des forces*. En effet, l'on connaît les surfaces des pistons du moteur et de l'indicateur ; et d'autre part on a taré directement le ressort, tout aussi bien pour les divers degrés de vide que pour les tensions supérieures à la pression atmosphérique. On peut donc graduer numériquement l'axe des ordonnées. Ce tarage doit être fréquemment vérifié, soit par comparaison avec un instrument-étalon, soit directement, en chargeant la tige de poids connus (1).

(1) Je termine ici ce *Cours de machines*, seconde moitié de mon *Cours d'exploitation des mines et machines*, dont la première, le *Cours d'exploitation des mines*, a paru en 1883 et 1885. Depuis que j'ai commencé cette nouvelle publication, le programme de la Chaire (voy. t. I, p. 5) a été modifié par M. le Ministre des Travaux publics, sur la proposition du Conseil de l'École nationale supérieure des Mines. La théorie de la résistance des matériaux en a été détachée, et a été annexée au Cours de constructions, pour permettre de donner, dans un enseignement aussi chargé, plus de développements à la théorie des moteurs. C'est par suite dans cet esprit que j'ai achevé cet ouvrage, en le pliant à ce nouveau cadre, et cherchant à en faire un *Traité des moteurs hydrauliques et thermiques*. Plus tard encore, une nouvelle modification est intervenue. Le Cours a été divisé en deux autres, et deux Professeurs m'ont succédé à la fois, l'un pour l'*exploitation des mines*, l'autre pour les *machines*, au moment où j'ai été appelé à la Direction de l'École des Mines.

TABLE DES MATIÈRES

CINQUIÈME PARTIE — CHAUDIÈRES A VAPEUR

CHAPITRE LIII. — COMBUSTION.

CHAPITRE LIV. — Corps cylindrique.

CHAPITRE LV. — Chaudières a corps cylindrique.

CHAPITRE LXI. — Explosions.

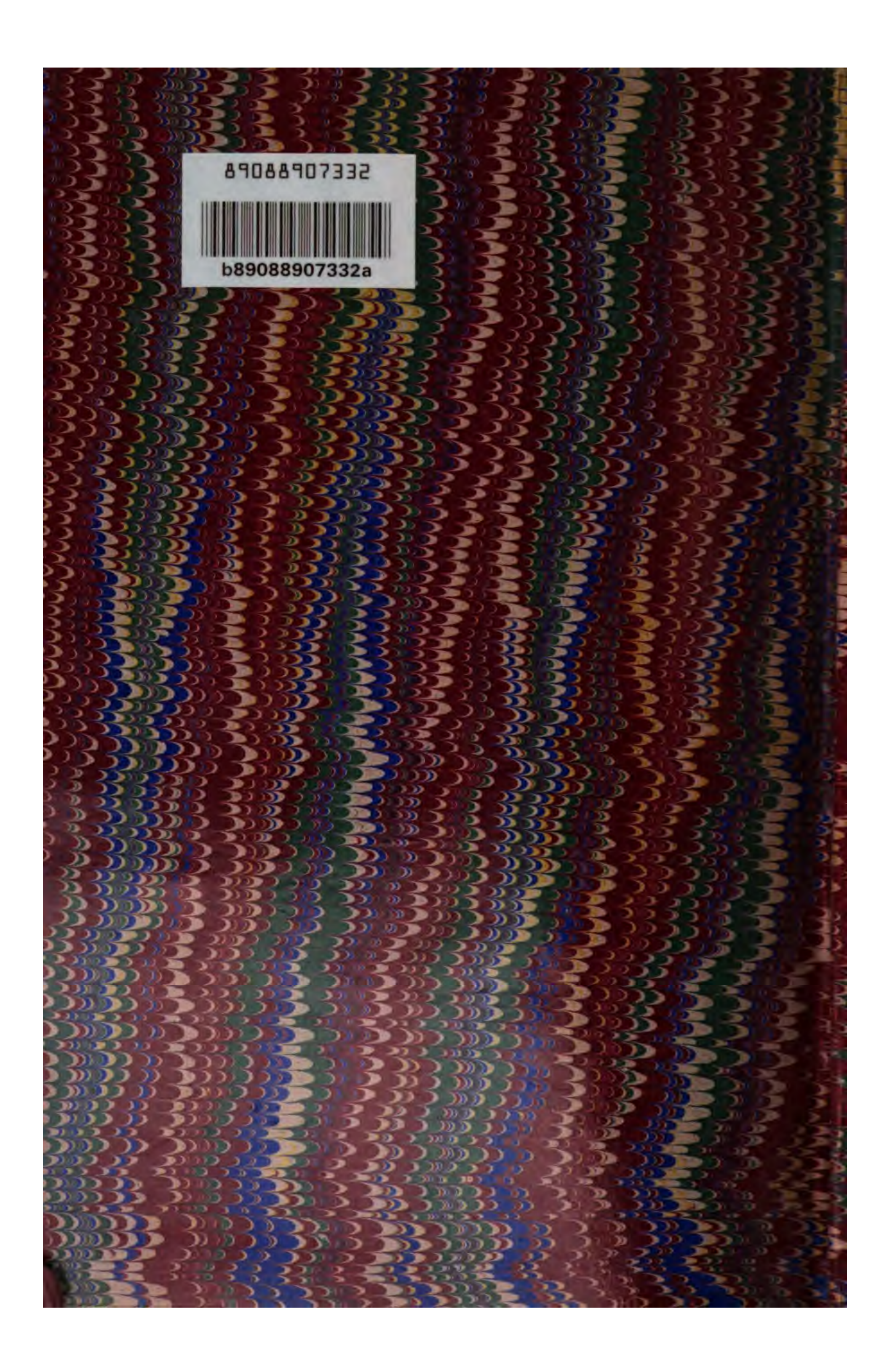
CHAPITRE LXII. — Réglementation.

CHAPITRE LXIII. — Appareils de sureté.

CHAPITRE LXIV. — Condenseur.

CHAPITRE LXV. — Indicateur.

24412. — PARIS, IMPRIMERIE A. LAHURE
9, rue de Fleurus, 9.


89088907332
b89088907332a




89088907332
B89088907332A